

УДК 546.27: 544.171.6:544.023.26

**РЕНТГЕНОЭЛЕКТРОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА
ИСХОДНОЙ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ НА ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО СТРОЕНИЯ
ПЛЕНОК ГЕКСАГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ
PECVD ИЗ БОРАЗИНА****Е.А. Ильинчик, И.С. Меренков**

Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: merenkov@niic.nsc.ru

Статья поступила 27 июля 2015 г.

С доработки — 7 декабря 2015 г.

Пленки гексагонального нитрида бора синтезированы методом плазмохимического осаждения из газовой смеси боразина и аммиака или гелия на подложке Si(100). Методом РФЭС исследованы изменения электронного строения и химического состава пленок в зависимости от состава исходной газовой смеси. Установлено, что химический состав полученных образцов зависит от используемого газа. Использование гелия приводит к избытку на поверхности пленки атомов бора, появлению связей В—В и понижению вклада связей В—N в гексагональном окружении. Показано, что получение пленок h-BN, близких к стехиометрическому составу, в плазмохимических процессах с использованием боразина возможно при добавлении аммиака. Также на основе литературных данных проведен расчет энергий связи в В1s-спектрах для различных окружений атома бора в гексагональной решетке.

DOI: 10.15372/JSC20160406

Ключевые слова: гексагональный нитрид бора, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, электронное строение, тонкие пленки, PECVD, боразин, наностенки.

ВВЕДЕНИЕ

Нитрид бора — уникальный синтетический материал, обладающий многообещающим комплексом оптических, электрофизических и механических свойств, что позволяет находить ему применение во многих областях [1]. Структурное подобие BN с углеродом позволяет получать слоистые сотоподобные кристаллы (h-BN) и различные наноструктуры, такие как нанотрубки, монослои и т.д. [2—7]. В последние годы особое внимание уделяется получению и исследованию свойств новых типов структур на основе нитрида бора, таких как вертикально ориентированные слои — наностенки [8—11]. Традиционным способом получения нанокристаллических пленок и наноструктур h-BN является термическое разложение при пониженном давлении (LPCVD) борсодержащего предшественника — боразина ($B_3N_3H_6$), который является наиболее подходящим для таких процессов, так как содержит в себе все необходимые для синтеза элементы в соотношении В:N = 1:1, причем в нужной структурной модификации — шестиугольник с чередующимися атомами бора и азота [12, 13]. Однако высокая температура его разложения (>900 °C) является сдерживающим фактором для широкого распространения пленок нитрида бора в микроэлектронике. Для преодоления этого ограничения и снижения температуры получения пленок было предложено использовать дополнительную активацию газовой фазы с помощью плазмы ВЧ-разряда (PECVD) [14]. В качестве исходной обычно используется

смесь боразина с инертным газом-активатором, например, гелием или азотом. Температура получения пленок в плазмостимулированных процессах может быть снижена до 100 °С [15]. Однако было замечено, что использование боразина как единственного источника азота приводит к отклонениям от стехиометрического состава в сторону избытка бора [16]. Для достижения стехиометрического состава пленок BN необходимо использовать дополнительный газ, помимо инертных газов-активаторов или вместо них, который являлся бы источником азота в системе. Наиболее подходящим вариантом является аммиак. В литературе практически отсутствуют сведения о получении пленок методом PECVD из боразина и аммиака, не проводились исследования зависимостей состава и структуры получаемых образцов от состава исходной газовой смеси.

В настоящей работе изучено изменение состава и структуры пленок нитрида бора в зависимости от состава исходной газовой смеси в процессах плазмохимического осаждения. Проведено исследование влияния состава газовой фазы на электронное строение и элементный состав пленок h-BN, осажденных методом PECVD из смесей боразина с гелием или аммиаком на подложки Si(100). Для установления электронного строения и элементного состава пленок применяли метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Благодаря высокой чувствительности данного метода возможно определить химическое соединение, в котором находится наблюдаемый элемент, и точный количественный состав образца. Важной особенностью РФЭС является высокая поверхностная чувствительность, которая создает определенные трудности при интерпретации результатов, связанные с неконтролируемым химическим воздействием на поверхность образца атмосферы. Тем не менее метод РФЭС остается одним из главных инструментов количественного определения состава при исследовании тонких пленок [17].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Пленки нитрида бора ($d = 10\text{—}20$ нм) синтезировали методом плазмохимического осаждения из газовой фазы с использованием исходной газовой смеси боразина и аммиака или гелия. Парциальные давления компонентов в исходной газовой смеси и их соотношение приведено в табл. 1. Температура синтеза во всех экспериментах составляла 400 °С, остаточное давление не превышало $2 \cdot 10^{-3}$ Торр. Подробное описание используемой установки для плазмохимического осаждения пленок BN приведено в работе [18].

Спектры РФЭС записаны на фотоэлектронном спектрометре VG-Escalab-250 в режиме постоянной энергии пропускания энергоанализатора фотоэлектронов. Для возбуждения эмиссии электронов использовали монохроматизированное рентгеновское излучение AlK_{α} ($h\nu = 1486,6$ эВ). Стандарт — C1s-линия углеводородов, адсорбированных на поверхности образца, $E(C1s)$ 284,8 эВ. Точность определения энергий связи $\pm 0,1$ эВ. Предварительную подготовку поверхности образца путем бомбардировки его ионами Ag^+ не проводили.

Качественный химический состав поверхности определяли по обзорным спектрам в диапазоне 0—1400 эВ при энергии пропускания спектрометра $h\nu = 50$ эВ, что соответствует максимуму чувствительности спектрометра, и шаге развертки 0,5 эВ. Для определения количественного состава и химического состояния элементов проводили съемку узких спектральных районов

Т а б л и ц а 1

Парциальное давление компонентов
в исходной газовой смеси

Образец	Парциальное давление, Торр			$B_3N_3H_6/NH_3$
	$B_3N_3H_6$	NH_3	He	
1	$6 \cdot 10^{-3}$	—	$6 \cdot 10^{-3}$	—
2	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	—	0,5
3	$6 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	—	1
4	$6 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	—	1,5

при постоянной энергии пропускания спектрометра $h\nu = 10$ эВ с шагом 0,05 эВ и накоплением для усреднения шумов. Угол отбора фотоэлектронов 90°.

Количественный анализ состава выполнен на основе расчета интегральных интенсивностей соответствующих узких линий в спектрах РФЭС с учетом поправки на атомную чувствительность элементов ASF. Обработка и покомпонентное разложение спектров на составляющие, форма которых описывается смешан-

ной функцией Гаусса—Лоренца, выполнены с помощью программы Spectr. Значение полуширины спектральных компонентов в разложении принимали одинаковым; фон вычитали по методу Ширли.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Значения энергий связи 1s электронов атомов бора в гексагональной системе из атомов В, С, N, О. При анализе тонкослойных покрытий методом РФЭС присутствует некоторая неопределенность в отнесении рентгеноэлектронных пиков или компонентов спектрального разложения к структурному типу рассматриваемого атома [19]. Гексагональный нитрид бора h-BN характеризуется графитоподобным строением с sp^2 -гибридизацией валентных связей, NB(N)N. Появление в спектре B1s компонентов с более высокими значениями $E(B1s)$ по сравнению с ожидаемым значением возможно либо за счет расширения числа ближайших соседей, либо замещения атомов азота на более электроотрицательные атомы кислорода.

Увеличение числа атомов ближайшего окружения обусловлено хемосорбцией, например, присоединением к электрофильному атому бора нуклеофильных реагентов с неподеленной электронной парой, таких как CO, NH₃. При этом гибридизация из гексагональной sp^2 переходит в тетраэдрическую sp^3 , а формальный заряд на атоме бора становится отрицательным (–1). По "висячим" связям на границах нанокластерных образований возможно присоединение кислородсодержащих групп, таких как O, OH, OR и др., с сохранением на атоме бора гибридизации sp^2 . Также возможно бидентатное связывание атома бора с двумя нуклеофильными центрами, например мочевины (NH₂)₂CO, соответственно гибридизация становится sp^3 .

Наиболее простой путь к систематизации экспериментальных данных РФЭС по покомпонентному отнесению — это количественная оценка ожидаемых значений $E(B1s)$ для атома В в различном окружении. В рамках потенциальной модели изменение энергии связи внутренних электронов данного атома определяется его ближайшим окружением, а величина и направление сдвига зависит от электроотрицательностей атомов этого окружения [20]. Здесь рассмотрены состояния атома бора в гексагональном окружении из атомов В, С, N, О.

Анализ литературных данных РФЭС по индивидуальным борсодержащим соединениям с sp^2 гибридизацией атома бора позволил отобрать достаточный набор достоверных значений, скомпилированных в табл. 2. Заряд определен по стандартной схеме с использованием модифицированных значений, введенных в работе [21].

Зависимость экспериментальных значений $E(B1s)$ от зарядового параметра Полинга q_p (рис. 1) описывается уравнением:

$$E(B1s) = 187,76 + 4,72 \times q_p. \quad R = 0,9997, \quad SD = 0,064.$$

Определенные из полученного уравнения значения $E(B1s)_{\text{теор}}$, ожидаемые для заданных конфигураций, приведены в табл. 2.

Таким образом, в рамках используемого приближения ожидаемые значения энергий связи $E(B1s)$ для различных локальных конфигураций с центральным атомом бора разбиваются на семь групп. В пределах этих групп индивидуальные конфигурации неразличимы (группы III—VI) или слабо различимы — VII. Кроме того, влияние дифференциальной подзарядки поверхностно окисленных слоев может существенно осложнить интерпретацию полученных результатов [22, 30].

Анализ спектров РФЭС пленок h-BN, полученных из боразина и аммиака или гелия. Обзорные спектры РФЭС отражают наличие в образцах, наряду с целевыми элементами бором и азотом, кремния, углерода и кислорода. Фотоэлектроны Si2p

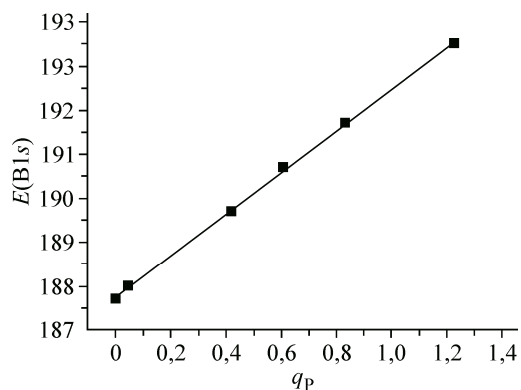


Рис. 1. Зависимость $E(B1s)$ от зарядового параметра Полинга q_p

Т а б л и ц а 2

Значения $E(B1s)$ в гексагональной сетке, образованной атомами В, С, N, О.
Стандарт $E(C1s) = 284,8$ эВ

Образец	Конфигурация	q_F	$E(B1s)_{\text{эксп}}$	$E(B1s)_{\text{геор}}$	Группа	Ссылка
1	BO_3	1,227	193,5	193,55	I	[22—24]
2	NBO_2	1,020		192,57	II	
3	CBO_2	0,833	191,7	191,69	III	[25]
4	BBO_2	0,818		191,62		
5	N_2BO	0,813		191,60		
6	$CB(N)O$	0,626		190,71	IV	
7	$BB(N)O$	0,611		190,64		
8	BN_3	0,606	190,7	190,62		[26]
9	C_2BO	0,439		189,83	V	
10	$BB(C)O$	0,424		189,76		
11	CBN_2	0,419	189,7	189,74		[27]
12	B_2BO	0,409		189,69		
13	BBN_2	0,404		189,66		
14	C_2BN	0,232		188,86	VI	
15	$BB(C)N$	0,217		188,78		
16	B_2BN	0,202		188,71		
17	BC_3	0,045	188,2	187,97	VII	[28]
18	$BB(C)C$	0,030		187,90		
19	B_2BC	0,015		187,83		
20	BB_3	0,0	187,7	187,76		[29]

и $Si2s$ обусловлены подложкой, $C1s$ и $O1s$ — загрязнением поверхности углеводородами, присутствующими в атмосфере.

Соотношение химически неэквивалентных атомов В, N, С и О оценено из разложения спектров РФЭС внутренних уровней в предположении, что значения площади компонентов пропорциональны значениям концентрации соответствующих атомов.

В спектре $C1s$ (рис. 2) основной компонент при 284,8 эВ соответствует состояниям атомов углерода со связями $C-C$ и $C-H_x$ в адсорбированном углеводородном слое [31].

От 10,5 до 28 % атомов углерода можно отнести к группам, в которых присутствует связь $C-N$ или $C-C-O$ (компонент при $285,5 \pm 0,2$ эВ) и $C=N$ (компонент при $286,5 \pm 0,3$ эВ) [32]. Лишь 3—9 % атомов углерода связаны с кислородом (компоненты при $288,3 \pm 0,4$ и $289,3 \pm 0,4$ эВ) [33]. В спектрах образцов 3 и 4 присутствует компонент при $287,3 \pm 0,1$ эВ, который можно отнести к состояниям в конфигурации $N-C-O$.

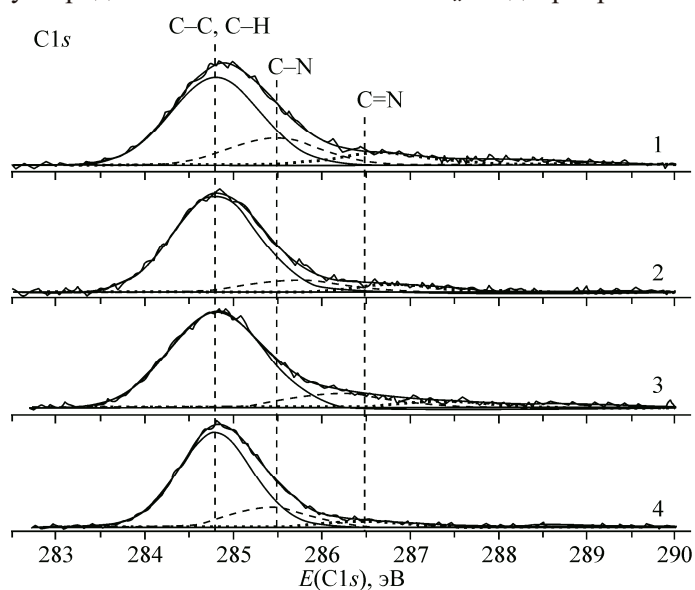


Рис. 2. $C1s$ -спектр РФЭС пленок, синтезированных из смеси с различным соотношением боразин/аммиак и смеси боразина с гелием

Т а б л и ц а 3

Данные по тонкой структуре спектров C1s пленок E(C1s), эВ

Образец	$E_{св}$, эВ (ат.%)					
	C—C, C—H	C—N	C=N	N—C—O	C—O	C=O
1	284,8 (65,3)	285,5 (20,1)	286,7 (8,3)		288,1 (4,3)	290,0 (2,0)
2	284,8 (79,4)	285,7 (10,5)	286,8 (5,9)		287,9 (2,0)	289,3 (2,0)
3	284,8 (58,7)	286,2 (22,4)		287,4 (9,8)	288,7 (5,9)	289,7 (3,2)
4	284,8 (74,7)	285,4 (16,0)	286,5 (4,8)	287,2 (1,4)	288,3 (1,8)	289,3 (1,3)

Типы химических связей с участием атомов углерода и характер изменения их концентраций позволяют предположить, что атомы С сконцентрированы в адсорбированном слое и не входят в состав исследуемой пленки h-BN. Энергии связей, отнесение компонентов C1s-спектров и концентрации химически неэквивалентных атомов углерода в образцах представлены в табл. 3.

Основной компонент спектров B1s (рис. 3) при $190,5 \pm 0,1$ эВ соответствует атомам бора, находящимся в окружении трех атомов азота, подобно гексагональной структуре BN [34]. Содержание таких атомов максимально в образце 3, осажденном из смеси боразина с аммиаком в соотношении 1:1, — 87,1 %. При изменении соотношения $B_3N_3H_6/NH_3$ доля таких атомов уменьшается до 83 %. Значительное сокращение вклада h-BN (66,5 %) происходит при использовании в качестве инертного газа-активатора гелия, образец 1, и сопровождается соответствующим увеличением вклада кислородсодержащих компонентов при 191 и 192 эВ.

В образцах, полученных с использованием в качестве газа-активатора аммиака, приблизительно 12—14 % атомов бора содержат в своем ближайшем окружении атомы азота и кислорода одновременно. Это отражают спектральные компоненты при $191,2 \pm 0,3$ и $192,3 \pm 0,4$ эВ [35]. Наибольшее количество атомов бора, вовлеченных в связывание B—O (~24 %), наблюдается в образце, полученном из смеси боразина с гелием. Это объясняется снижением количества атомарного водорода в плазме (по сравнению со случаями использования аммиака [36]), способного связывать кислород с образованием молекул воды, уменьшая, таким образом, его концентрацию в пленке. Наличие связей бора с кислородом является доказательством, что атомы О могут входить в структуру пленки в процессе роста. Помимо этого возможен процесс химической адсорбции на поверхности образца молекул кислорода и воды при нахождении пленки вне реактора. В B1s-спектре РФЭС пленки, полученной с использованием гелия, наблюдается малоинтенсивный компонент (2,5 %) при 188,5 эВ, который может быть отнесен к связи B—B в структурах BVN_2 , где дополнительный атом бора замещает один из атомов азота. Это свидетельствует об избытке атомов бора в пленке и может привести к ухудшению электрофизических свойств [28]. В табл. 4 представлен анализ компонент B1s-спектра РФЭС и атомные концентрации, определенные из разложения этих спектров.

N1s-спектр РФЭС (рис. 4) представлен в виде 3—5 компонент. Высокоинтенсивная компонента при $398,1 \pm 0,1$ эВ соответствует атомам азота,

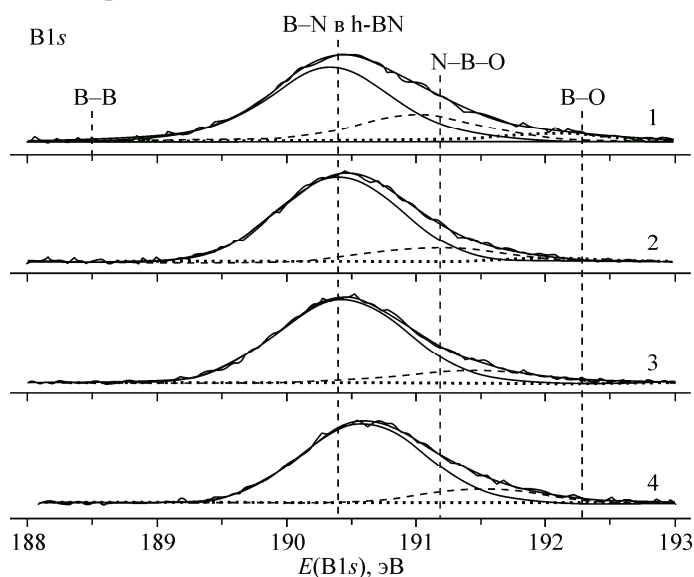


Рис. 3. B1s-спектр РФЭС пленок, синтезированных из смеси с различным соотношением боразин/аммиак и смеси боразина с гелием

Т а б л и ц а 4

Тонкая структура спектров $B1s$ пленок $E(B1s)$, эВ

Образец	$E_{св}$, эВ (ат. %)			
	B—N в h-BN	N—B—O	B—O	B—B
1	190,4 (66,5)	191,0 (24,2)	192,1 (6,8)	188,5 (2,5)
2	190,4 (82,9)	191,2 (14,4)	192,0 (2,7)	
3	190,4 (87,1)	191,4 (11,9)	192,6 (1,0)	
4	190,6 (83,4)	191,5 (14,5)	192,7 (2,1)	

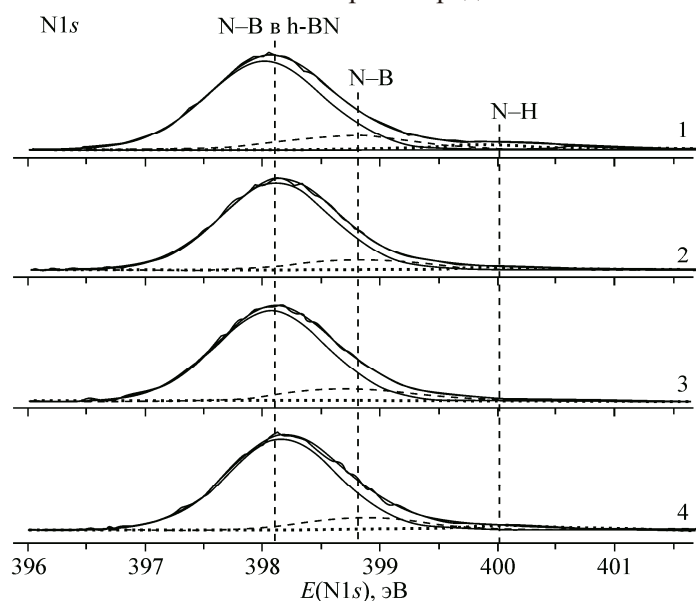
Т а б л и ц а 5

Тонкая структура спектров $N1s$ пленок $E(N1s)$, эВ

Образец	$E_{св}$, эВ (ат. %)				
	N—B в h-BN	N—B	N—H	N—C	C—O
1	398,0 (79,0)	398,7 (13,0)	399,9 (4,2)	400,8 (2,7)	401,8(1,1)
2	398,1 (87,0)	398,8 (10,4)	400,0 (2,6)		
3	398,0 (84,5)	398,8 (12,5)	399,9 (3,0)		
4	398,2 (84,5)	398,9 (11,7)	400,1 (3,0)		

связанным с атомами бора в гексагональном нитриде бора (табл. 5) [34]. Количество таких атомов высоко (около 84,5%), в случае избытка аммиака содержание несколько увеличивается до 87%. При использовании смеси боразина с гелием наблюдается уменьшение количества подобных атомов до 79%. Компонент при $398,8 \pm 0,1$ эВ также может быть отнесен к связи B—N, где атом бора находится в окружении атомов азота, однако их расположение отлично от гексагонального [31]. Количество таких атомов составляет от 10 до 13%. С углеродом связано 3—7% атомов азота, причем атом азота находится в конфигурации sp^2 (компонент при $400,0 \pm 0,1$ эВ) [31]. При использовании смеси боразина с гелием пленки имеют в своем составе атомы азота (1,1%), входящие в состав кислородсодержащих групп (компонент при 401,8 эВ) [37].

Помимо энергий связи важной характеристикой является разница энергий между отдельными компонентами спектра. В представленных спектрах разница между $B1s$ и $N1s$ составляет

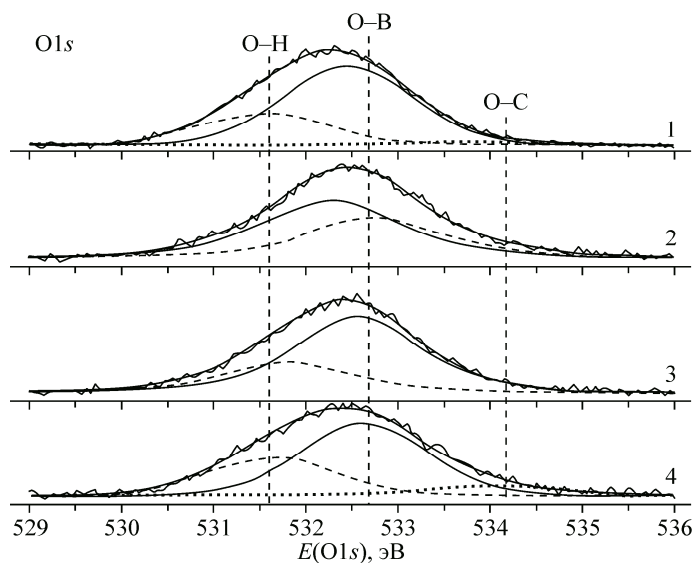


207,6 \pm 0,1 эВ. Это значение совпадает с литературными данными для гексагонального нитрида бора [34].

$O1s$ -спектр РФЭС (рис. 5) представлен двумя интенсивными компонентами. Первый при $531,9 \pm 0,4$ эВ соответствует связям кислорода с водородом в адсорбированной молекуле воды (28—60%) [38]. Второй компонент при $532,7 \pm 0,1$ эВ соответствует связи атомов кислорода с бором [24]. Таких атомов от 40 до 72%. До 8%

Рис. 4. $N1s$ -спектр РФЭС пленок, синтезированных из смеси с различным соотношением боразин/аммиак и смеси боразина с гелием

Рис. 5. O1s-спектр РФЭС пленок, синтезированных из смеси с различным соотношением боразин/аммиак и смеси боразина с гелием



атомов кислорода связаны с углеродом в структурах типа $-\text{CO}_2$ и $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ [39]. Анализ разложения O1s-спектра РФЭС и концентрация атомов O представлены в табл. 6.

Химический состав поверхности образцов, рассчитанный из интенсивностей спектров показан в табл. 7.

При использовании аммиака в качестве дополнительного газа наблюдается незначительное пересыщение образца по азоту, что может возникать вследствие наличия атомов азота в адсорбированном слое. В случае с гелием имеется обратная картина, и в образце обнаружен избыток атомов бора. Данный факт подтверждается и наличием в разложении B1s-спектра в случае гелия компоненты, отвечающей связи B—B. Явление пересыщения по бору в высокотемпературных синтезах из смесей боразина с инертными газами было ранее упомянуто в работе [16]. Однако в PECVD процессах такое явление не рассматривалось. Добавление аммиака благоприятно влияет на получение пленок нитрида бора с соотношением B/N, близким к 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен подробный анализ литературных данных и на их основе проведен расчет значений энергий связи в B1s-спектрах, которые стоит ожидать при различном атомном окружении атома бора в гексагональной решетке. Выполнено сравнительное исследование влияния состава исходной газовой смеси на электронное строение и химический состав пленок, полученных методом плазмохимического осаждения из газовой фазы из смеси боразина с аммиаком или гелием. Установлено, что образцы преимущественно состоят из гексагонального нитрида бора (до 87%), где каждый атом бора окружен тремя атомами азота и наоборот. Изменение количества аммиака в газовой смеси ведет к незначительным изменениям количества таких связей. Использование гелия в исходной газовой смеси приводит к уменьшению содержания гексагональной составляющей, увеличению концентрации связи B—O и появлению связи B—B. Кроме того, было установлено, что на поверхности образца присутствует пленка адсорбированных углеводородов, кислорода и воды. Атомы углерода, как предполагается, находятся только в адсорбированном слое. Было показано, что атомы кислорода входят как в структуру пленки, образуя связи с бором, так и находятся в адсорбированном слое в составе молекул воды, кислорода

Т а б л и ц а 6

Тонкая структура спектров O1s пленок E(O1s), эВ

Образец	E _{св} , эВ (ат. %)		
	O—H в H ₂ O	O—B	O—C
1	531,6 (27,8)	532,5 (69,4)	533,9 (2,8)
2	532,3 (59,8)	532,8 (40,2)	
3	531,8 (27,6)	532,6 (72,4)	
4	531,6 (32,0)	532,6 (60,3)	534,0 (7,7)

Т а б л и ц а 7

Приповерхностный состав пленок (~2 нм), полученных в процессе PECVD из боразина, ат.%

Образец	Концентрация атомов элемента, ат.%				B/N
	B	N	C	O	
1	36,3	33,0	19,9	10,8	1,10
2	35,8	37,3	20,0	6,9	0,96
3	38,0	40,7	13,9	7,4	0,93
4	28,2	29,0	35,3	7,5	0,97

и карбонильных групп углеводов. Установлено, что для получения пленок h-BN, близких к стехиометрическому составу, в процессах с применением плазмы необходимо использовать азотсодержащий реакционноспособный газ, например, аммиак.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pakdel A., Bando Y., Golberg D. // Chem. Soc. Rev. – 2014. – **43**, N 3. – P. 934.
2. Jiang X., Weng Q., Wang X. et al. // J. Mater. Sci. Technol. – 2015. – **31**, N 6. – P. 589.
3. Lin Y., Connell J.W. // Nanoscale. – 2012. – **4**, N 22. – P. 6908.
4. Song L., Ci L., Lu H. et al. // Nano Lett. – 2010. – **10**, N 8. – P. 3209.
5. Lei Y., Wang Y., Song Y. et al. // Mater. Lett. – 2011. – **65**, N 2. – P. 157.
6. Zhong B., Huang X., Wen G. et al. // Nanoscale Res. Lett. – 2010. – **6**, N 1. – P. 36.
7. Pakdel A., Zhi C., Bando Y. et al. // Nanotechnology. – 2012. – **23**, N 21. – P. 215601.
8. Zhang C., Hao X., Wu Y. et al. // Mater. Res. Bull. – 2012. – **47**, N 9. – P. 2277.
9. Yu J., Qin L., Hao Y. et al. // ACS Nano. – 2010. – **4**, N 1. – P. 414.
10. Pakdel A., Wang X., Zhi C. et al. // J. Mater. Chem. – 2012. – **22**, N 11. – P. 4818.
11. BenMoussa B., D'Haen J., Borschel C. et al. // J. Phys. D. Appl. Phys. – 2012. – **45**, N 13. – P. 135302.
12. Li J., Zhang C., Li B. et al. // Surf. Coatings Technol. – 2011. – **205**, N 12. – P. 3736.
13. Gibb A., Alem N., Zettl A. // Phys. Status Solidi. – 2013. – **250**, N 12. – P. 2727.
14. Nguyen S.V. // J. Electrochem. Soc. – 1994. – **141**, N 6. – P. 1633.
15. Korshunov A.N., Kosinova M.L., Salman E.G. et al. // Phys. Status Solidi. – 1992. – **133**. – P. K57.
16. Kouvetakis J. // J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film. – 1990. – **8**, N 6. – P. 3929.
17. Кузнецов Ф.А., Воронков М.Г., Борисов В.О., Игуменов И.К., Каичев В.В., Кеслер В.Г., Кириенко В.В., Качай В.Н., Косинова М.Л., Кривенцов В.В., Лебедев М.С., Лис А.В., Морозова Н.Б., Никулина Л.Д., Рахлин В.И., Румянцев Ю.М., Смирнова Т.П., Суляева В.С., Сысоев С.В., Титов А.А., Файнер Н.И., Цырендоржиева И.П., Черняевский Л.И., Яковкина Л.В. Фундаментальные основы процессов химического осаждения пленок и структур для нанoeлектроники / Т.П. Смирнова (ред.) – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
18. Меренков И.С., Косинова М.Л., Ермакова Е.Н. и др. // Неорган. матер. – 2015. – **51**, № 11. – С. 1183.
19. Uddin M.N., Shimoyama I., Baba Y. et al. // J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film. – 2005. – **23**, N 3. – P. 497.
20. Gelius U., Hedén P.F., Hedman J. et al. // Phys. Scr. – 1970. – **2**, N 1-2. – P. 70.
21. Jolly W.L. // J. Am. Chem. Soc. – 1970. – **92**, N 11. – P. 3260.
22. Joyner D.J., Hercules D.M. // J. Chem. Phys. – 1980. – **72**, N 2. – P. 1095.
23. Wang Y., Fan J., Trenary M. // Chem. Mater. – 1993. – N 15. – P. 192.
24. Wang Y., Trenary M. // Chem. Mater. – 1993. – N 364. – P. 605.
25. Hendrickson D.N., Hollander J.M., Jolly W.L. // Inorg. Chem. – 1970. – **9**, N 3. – P. 612.
26. Widmayer P., Boyen H.-G., Ziemann P. et al. // Phys. Rev. B. – 1999. – **59**, N 7. – P. 5233.
27. Зайцев Б.Е., Безуглая З.В., Авраменко Г.В., Иванова Т.М., Лисютенко В.Н. // Журн. орган. химии. – 1985. – **55**, № 6. – С. 1398.
28. Uddin M.N., Shimoyama I., Baba Y. et al. // Appl. Surf. Sci. – 2005. – **241**, N 1-2. – P. 246.
29. Foo W.C., Ozcomert J.S., Trenary M. // Surf. Sci. – 1991. – **255**. – P. 245.
30. Ong C.W., Huang H., Zheng B. et al. // J. Appl. Phys. – 2004. – **95**, N 7. – P. 3527.
31. Liu L., Wang Y., Feng K. et al. // Appl. Surf. Sci. – 2006. – **252**, N 12. – P. 4185.
32. Wada Y., Yap Y., Yoshimura M. et al. // Diam. Relat. Mater. – 2000. – **9**, N 3-6. – P. 620.
33. Zhou F., Adachi K., Kato K. // Wear. – 2006. – **261**, N 3-4. – P. 301.
34. Jeon J.-K., Uchimaru Y., Kim D.-P. // Inorg. Chem. – 2004. – **43**, N 16. – P. 4796.
35. Kim S.Y., Park J., Choi H.C. et al. // J. Am. Chem. Soc. – 2007. – **129**, N 6. – P. 1705.
36. Soucy G., Jurewicz J.W., Boulos M.I. // Plasma Chem. Plasma Process. – 1995. – **15**, N 4. – P. 693.
37. Zhang Z., Kimura C., Sugino T. // J. Appl. Phys. – 2005. – **98**, N 3. – P. 036105.
38. Guimon C., Gonbeau D., Pfister-Guillouzo G. et al. // Surf. Interface Anal. – 1990. – **16**, N 1-12. – P. 440.
39. Olivares O., Likhanova N.V., Gómez B. et al. // Appl. Surf. Sci. – 2006. – **252**, N 8. – P. 2894.