

Синтез и исследование оптических свойств плёнок BC_xN_y , полученных из смеси N-триметилборазина и водорода

В. С. Суляева, М. Л. Косинова, Ю. М. Румянцев,
Б. М. Аюпов, В. Г. Кеслер, Ф. А. Кузнецов

Методом плазмохимического осаждения из газовой фазы с использованием N-триметилборазина (ТМБ) в качестве исходного вещества и водорода, как активирующего газа, синтезированы плёнки карбонитрида бора различного состава. В ходе экспериментов варьировали температуру осаждения, остальные условия процесса поддерживали постоянными. Свойства полученных плёнок изучены методами эллипсометрии, сканирующей электронной микроскопии, ИК-, энергодисперсионной и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и спектрофотометрии. Установлено, что температура подложки оказывает влияние на кинетику роста и физико-химические свойства слоёв карбонитрида бора в изученном интервале условий синтеза. Определены условия получения плёнок карбонитрида бора, прозрачных в УФ- и видимой области спектра. Предложена методика определения оптической ширины запрещённой зоны E_g и энергии Урбаха E_0 , и найдены зависимости E_g и E_0 от температуры синтеза слоёв BC_xN_y .

Ключевые слова: N-триметилборазин, карбонитрид бора, плазмохимическое осаждение из газовой фазы, ширина запрещённой зоны, энергия Урбаха.

BC_xN_y films of various composition were grown by plasma enhanced chemical vapour deposition using N-trimethylborazine as a precursor and hydrogen as activating agent in this process. Experiments were carried out at a various substrate temperatures, others process conditions were constant. Properties of obtained layers were studied by ellipsometry, scanning electron microscopy, FTIR-spectroscopy, energy dispersive spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, and optical transmittance spectrophotometry. It was found that the effect of growth kinetics and BC_xN_y layer properties is due to substrate temperature in the investigated region of film growth conditions. It is showed that transparent in UF/visible range of spectra BC_xN_y films are possible to grown by varying this parameter. Determination of band gap energy E_g and Urbah energy E_0 was proposed and E_g and E_0 dependence from BC_xN_y layers synthesis temperature was determine.

Key words: N-trimethylborazine, boron carbonitride, plasma enhanced chemical vapour deposition, band gap energy, Urbah energy.

Введение

Карбонитрид бора BC_xN_y привлекает внимание исследователей как перспективный материал для электронных приборов [1], износостойких покрытий [2] и оптических устройств [3]. Поэтому в настоящее время активно изучается получение плёнок карбонитрида бора методами химического и физического осаждения из газовой фазы. При этом в качестве исходных веществ используются различные источники бора, углерода и азота — элементов, необхо-

димых для синтеза плёнки BC_xN_y -галогениды и гидриды бора, различные углеводороды, азот или аммиак. В данной работе в качестве исходного соединения использовали N-триметилборазин $B_3N_3H_3(CH_3)_3$ (ТМБ), в котором содержатся готовые фрагменты $-B-N-C-$. Настоящая работа является продолжением и дополнением ранее проведённых нами исследований [4]. В частности, было проведено термодинамическое моделирование процессов осаждения различных конденсированных фаз в системе $B-C-N-H-O$ [5]. В литературе имеется

мало сведений по проблеме синтеза плёнок BC_xN_y из смеси паров ТМБ и водорода. В [6, 7] отмечено, что использование H_2 в качестве плазмо-активирующего газа по сравнению с аргоном и азотом увеличивает стабильность синтезируемых слоёв.

Цель данной работы — получение плёнок карбонитрида бора плазмохимическим разложением смеси N-триметилборазина и водорода, и исследование влияния параметров процесса осаждения на физико-химические свойства полученных слоёв.

Методика эксперимента

Осаждение плёнок BC_xN_y

Плёнки карбонитрида бора получали методом плазмохимического осаждения из газовой фазы с использованием N-триметилборазина в качестве исходного вещества — предшественника. В работе использовали кварцевый реактор (рис. 1), имеющий две зоны: возбуждения плазмы и роста плёнок. Возбуждение плазмы осуществляли с помощью ВЧ-генератора мощностью 40 Вт с частотой 40,68 МГц. В качестве дополнительного газа использовали водород, который предварительно проходил через зону возбуждения ВЧ-разряда, смешивался с парами исходного вещества и попадал в зону осаждения. Зону роста нагревали печью сопротивления до заданной температуры в интервале от 100 до 700 °С. Процесс осуществлялся при пониженном давлении в реакторе, при этом парциальное давление паров ТМБ составляло $1 \cdot 10^{-2}$ Торр. В проведенных экспериментах соотношение парциальных давлений ТМБ и дополнительного газа поддерживалось равным 2:1. Осаждение пленок BC_xN_y осуществлялось на подложки из монокристаллического Si(100) и кварцевого стекла. Подложки предварительно очищали обезжирива-

нием в трихлорэтилене и ацетоне и подвергали химическому травлению. Для характеристики плёнок карбонитрида бора применялся комплекс современных физико-химических методов исследования. Для определения толщины и показателя преломления слоёв использовали метод эллипсометрии (прибор ЛЭФ-3М), измерения проводили при длине волны $\lambda = 632,8$ нм. Расчет толщины и показателя преломления плёнок проводили по методике, изложенной в [8]. Регистрацию колебательных ИК-спектров поглощения плёнок карбонитрида бора осуществляли с помощью ИК Фурье спектрометра SCIMITAR FTS 2000 в области 375 – 4000 cm^{-1} . Исследование химического состава поверхности образцов выполнено методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на установке анализа поверхности SSC фирмы RIBER. Для возбуждения РФЭС спектров использовали алюминиевый источник с энергией линии AlK_{α} , равной 1486,6 эВ, мощность источника составляла 300 Вт, диаметр рентгеновского пучка — около 5 мм. Все РФЭС спектры получены при разрешении анализатора $\Delta E = const = 0,7$ эВ. Морфологию поверхности плёнок изучали с использованием сканирующей электронной микроскопии (прибор JEOL JSM-6700F). Методом энергодисперсионной спектроскопии определяли относительное содержание элементов (бора, углерода, азота и кислорода) в плёнках (приставка Energy Dispersive X-ray Analyzer EX-23000BU). Исследование прозрачности плёнок BC_xN_y , синтезированных на подложках из кварцевого стекла, осуществляли путём измерения коэффициента пропускания света в области 190 – 2000 нм с шагом 2 нм на приборе Scanning Spectrophotometer UV-3101PC Shimadzu. Результаты спектроскометрических измерений были использованы для оценки оптической ширины запрещённой зоны полученного материала.

Результаты и их обсуждение

Изучено влияние температуры синтеза на скорость осаждения плёнок BC_xN_y , их элементный и химический состав, морфологию поверхности и оптические характеристики. Толщина получаемых слоёв составляла от 50 до 270 нм. Исследование образцов методом ИК-спектроскопии (рис. 2) показало наличие в спектрах низкотемпературных плёнок, полученных при температурах подложки 100 – 350 °С, полос, соответствующих валентным колебаниям связей B – N и C=N, валентным и деформационным колебаниям связей B – H, C – H, N – H, что позволяет считать этот материал гидрогенизированным карбонитридом бора $BC_xN_y:H$. При увеличении темпера-

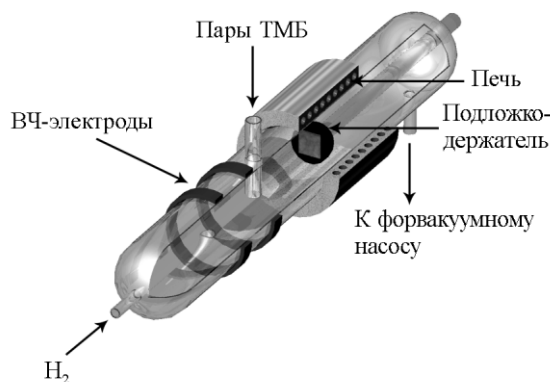


Рис. 1. Экспериментальный реактор для осаждения слоёв BC_xN_y .

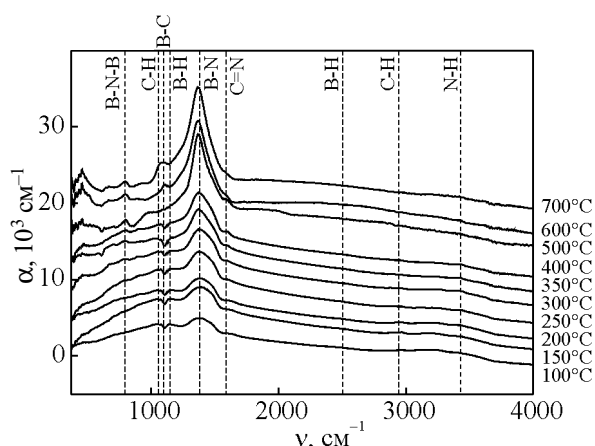


Рис. 2. ИК-спектры плёнок BC_xN_y , полученных из смеси ТМБ + H_2 (2:1) при различных температурах синтеза.

туры синтеза в ИК-спектрах плёнок увеличивается интенсивность полосы при 1380 см^{-1} , и появляется полоса при 800 см^{-1} . Эти полосы соответствуют колебаниям $\nu(B-N)$ и $\delta(B-N-B)$ в гексагональном нитриде бора [9]. При этом исчезают полосы колебаний водородсодержащих связей, и появляется полоса при 1100 см^{-1} , соответствующая колебаниям $\nu(B-C)$ в B_4C [10].

Анализ химического состава плёнок был проведён методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Экспериментальные РФЭ-спектры $B1s$, $C1s$ и $N1s$ плёнки BC_xN_y , синтезированной при температуре 400°C , представлены на рис. 3 совместно с результатами разложения фотоэлектронных пиков на отдельные спектральные компоненты. Для анализа во всех случаях выбирали минимально возможное число спектральных компонент, исходя из разрешения прибора, результатов экспериментов на эталонных образцах $h-BN$ и B_4C и литературных данных [11 – 18]. Результаты деконволюции спектров

Таблица

Результаты деконволюции фотоэлектронных пиков

Пик (FWHM, эВ)	Энергия связи, эВ	Площадь пика	Относительная площадь пика	Тип связи
$B\ 1s$ (2,17)	192,2	331	0,39	B – O – N
	190,7	383	0,46	BN, BC_2O
	189,5	104	0,12	B_xC
$C\ 1s$ (2,2)	187,0	22	0,03	B
	284,6	1636	0,70	C – C
	285,9	445	0,19	C – N
	288,1	183	0,08	C – O
	282,7	60	0,03	B – C
$N\ 1s$ (2,18)	401,6	130	0,06	N – O
	400,0	436	0,20	C – N – O
	398,2	1518	0,69	BN
	395,6	105	0,05	

Отношение концентрации N/B = 0,65.

приведены в таблице. Основную компоненту пика $C\ 1s$ с энергией связи $284,6\text{ эВ}$ принимали за пик адсорбированного углерода. В связи с тем, что загрязнения поверхности существуют всегда, точно оценить относительную концентрацию углерода в плёнке BC_xN_y на основе результатов поверхностно-чувствительного метода РФЭ-спектроскопии невозможно. Однако данный метод позволяет с высокой точностью определить отношение концентраций азота и бора N/B из отношений площадей пиков $N1s$ и $B1s$. По результатам исследования эталонных образцов это отношение составляет 0,65. Положение основных компонент фотоэлектронных линий $B1s$ и $N1s$ с энергиями связи $190,7$ и $398,2\text{ эВ}$ соответствуют соединению BN. Таким образом, большей частью плёнки является фаза нитрида бора. Остальной вклад вносят компоненты пиков бора, азота и углерода с более высокими энергиями связи, характерными для соединений этих химических элементов с кислородом. Компоненты $B\ 1s$ и $C\ 1s$ с энергиями связи

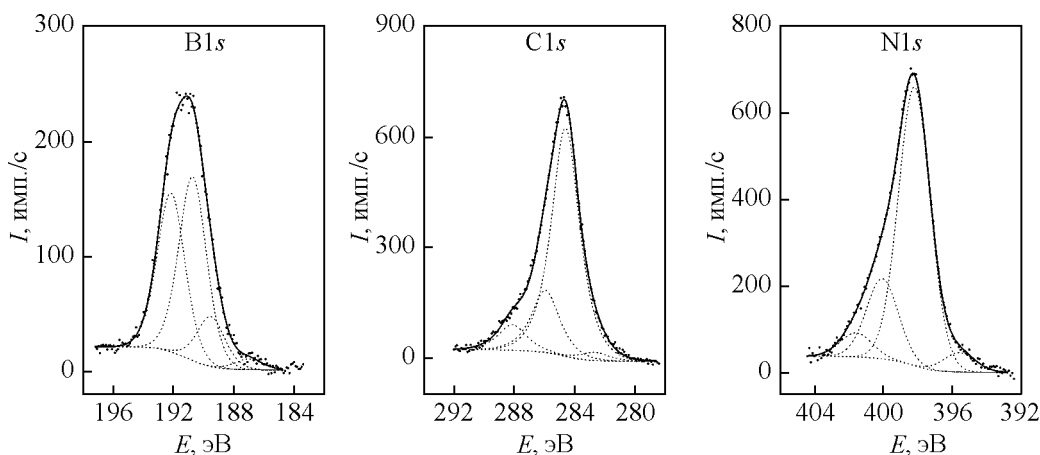


Рис. 3. РФЭ-спектры с поверхности плёнки BC_xN_y , синтезированной при температуре 400°C из смеси ТМБ + H_2 (2:1).

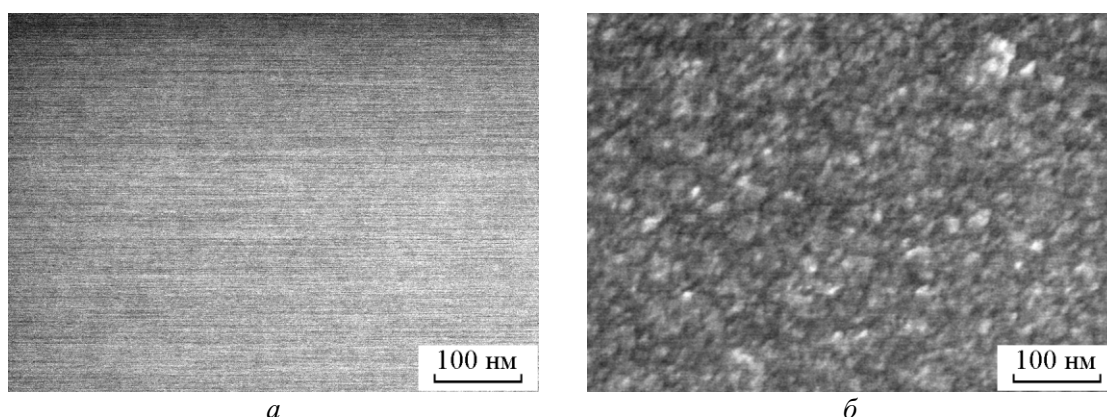


Рис. 4. Микрофотографии поверхности плёнок BC_xN_y , синтезированных из смеси ТМБ с водородом и температурах, °С: а – 100, б – 700.

189,5 и 282,7 эВ соответствуют связи В–С, однако, доля BC_x фазы не превышает 5%.

Исследование элементного состава плёнок карбонитрида бора методом энергодисперсионной спектроскопии показало, что в них обнаружены бор, углерод, азот и кислород. Имеющийся в плёнках водород не определяется этим методом, вследствие чего полученные результаты носят качественный характер. Измеренное относительное содержание элементов В, С, N, О практически не меняется с температурой синтеза. Объяснение причин появления кислорода в пленках и наблюдаемой температурной зависимости требует дополнительных исследований и здесь не обсуждается.

Температура синтеза влияет не только на состав, но и на структуру плёнок. С помощью сканирующей электронной микроскопии изучали микроморфологию плёнок BC_xN_y , выращенных при различных температурах в интервале 100 – 700 °С. На рис. 4 представлены микрофотографии поверхности низко-

температурной (100 °С) и высокотемпературной (700 °С) плёнок BC_xN_y . Видно, что поверхность низкотемпературной плёнки гладкая однородная, без видимых особенностей. Поверхность высокотемпературной плёнки шероховатая, содержит зёрна размером 15 – 20 нм, что может свидетельствовать о её нанокристаллической структуре.

Оптические свойства плёнок BC_xN_y

Оптические свойства являются одними из важнейших физических свойств плёнок BC_xN_y . Методом эллипсометрии, наряду с определением толщины плёнок, были получены значения показателей преломления всех образцов. Величина показателя преломления зависела от температуры синтеза плёнок и возрастала от 1,45 до 2,05 при увеличении температуры от 100 до 700 °С (рис. 5). Это увеличение связано с изменением химического состава плёнок с ростом температуры синтеза, как это показано

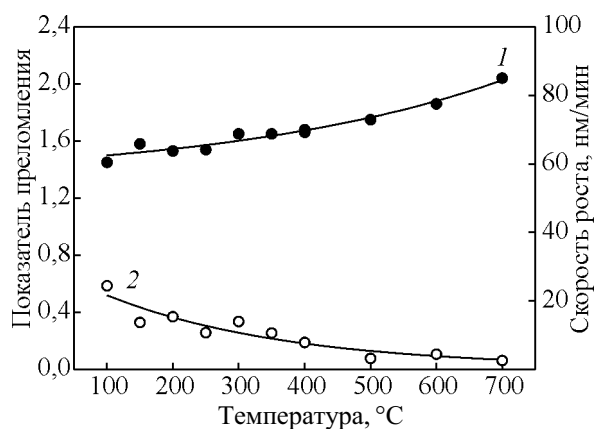


Рис. 5. Температурная зависимость: 1 – показателя преломления, 2 – скорости роста плёнок BC_xN_y , синтезированных из смеси ТМБ + H_2 (2:1).

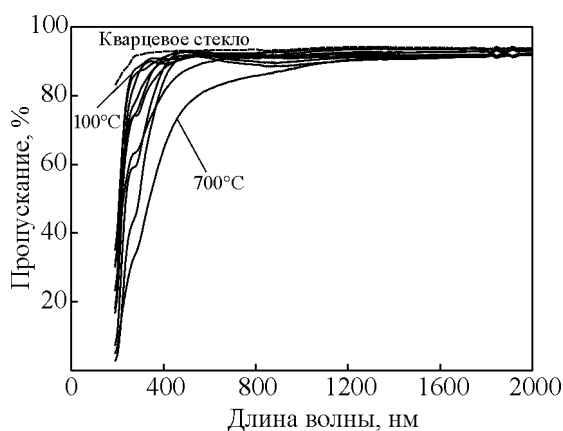


Рис. 6. Оптические спектры пропускания плёнок BC_xN_y , синтезированных из смеси ТМБ с водородом при различных температурах синтеза.

методами спектроскопии. Низкотемпературные плёнки, содержащие большое количество водород-содержащих связей в своем составе, имеют более низкий показатель преломления, чем высокотемпературные.

Другим важным параметром прозрачных плёнок является коэффициент пропускания света. На рис. 6 представлены оптические спектры пропускания плёнок BC_xN_y , синтезированных при различных температурах в интервале 100 – 700 °С. Из рисунка следует, что коэффициент пропускания плёнок очень высокий и зависит от температуры синтеза. Для низкотемпературных плёнок величина коэффициента пропускания в видимой области спектра (400 – 800 нм) составляет 90 – 93 %, что практически соответствует пропусканию кварцевого стекла. Прозрачность высокотемпературных плёнок в этой же области несколько ниже — 70 – 80 %, что связано с их химическим составом. Как было показано выше, в ИК-спектрах высокотемпературных плёнок отсутствуют связи, содержащие водород, и возрастает концентрация связей В – С. Увеличение содержания углерода в плёнках с ростом температуры синтеза уменьшает их прозрачность. Аналогичный результат был получен также в [19].

Оптические спектры пропускания плёнок BC_xN_y (рис. 6) были использованы для определения ширины запрещённой зоны и энергии Урбаха.

Расчет ширины запрещённой зоны

Расчет ширины запрещённой зоны плёнок BC_xN_y проводили путём решения обратной задачи спектроскопической фотометрии. По выбранной оптической модели рассчитывали интенсивность проходящего света и сравнивали с полученной из эксперимента. При условии нахождения достоверного начального приближения, если разница между ними мала, можно считать параметры оптической модели решением задачи по определению ширины запрещённой зоны, энергии Урбаха, толщины плёнки и дисперсии показателя преломления.

Поиск первоначального приближения по спектрам пропускания проводили путём проведения огибающих линий по минимумам и максимумам интенсивности, обусловленным интерференционными явлениями в плёнке. Для определения оптической ширины запрещённой зоны плёнки необходимо вычислить показатель экстинкции α по закону Бугера – Ламберта:

$$I = I_0 e^{-\alpha d}, \quad (1)$$

где I_0, I — интенсивность света, прошедшего через подложку без плёнки и прошедшего через подложку с плёнкой, d — толщина пластины. Зная механизм переноса электронов на краю поглощения, например:

$$\alpha = A \frac{(E - E_g)^m}{E^n}, \quad (2)$$

где n и m — натуральные числа.

можно построить график в координатах

$$(\alpha \cdot E^n)^{1/m} = E - E_g \quad (3)$$

и при экстраполяции прямой части уравнения (3) до пересечения с осью абсцисс найти значение оптической ширины запрещённой зоны.

В первом приближении ширину запрещённой зоны можно определять по правилу: E_g равна такой энергии, при которой $\alpha = 1 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ [20]. Это правило не зависит от механизма переноса электронов и может быть использовано, когда описываемые в формуле (2) параметры не известны. При энергиях меньших, чем край фундаментального поглощения E_g , зависимость $\alpha(E)$ для аморфных систем имеет экспоненциальную форму, которая описывается эмпирическим правилом Урбаха [21]

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \exp\left(\frac{E - E_g}{E_0}\right), \quad (4)$$

α_0 — константа.

Из данных показателей экстинкции при $E < E_g$ энергия Урбаха E_0 вычисляется по формуле

$$E_0 = \frac{E - E_g}{\ln(\alpha / \alpha_0)}. \quad (5)$$

Наличие Урбаховского “хвоста” непосредственно связано с присутствующим в системе структурным беспорядком, а E_0 является мерой этого беспорядка и отражает вклад статического и динамического разупорядочения через смещение атомов из их положения равновесия [22].

В результате проведённых расчётов найдено, что ширина запрещённой зоны E_g плёнок BC_xN_y изменяется от 5,55 до 2,29 эВ при изменении температуры подложек от 100 до 700 °С, как это следует из рис. 7. Таким образом, низкотемпературные плёнки BC_xN_y являются широкозонными материалами ($E_g > 3,5$ эВ). Наши данные согласуются с полученными ранее значениями E_g , равными 3,78 – 3,92 эВ [23] и 1,48 – 2,00 эВ [24] для аморфных плёнок BCN.

Энергия Урбаха, вычисленная по формуле (5), имеет простой физический смысл: чем она больше, тем быстрее уменьшаются с ростом энергии фото-

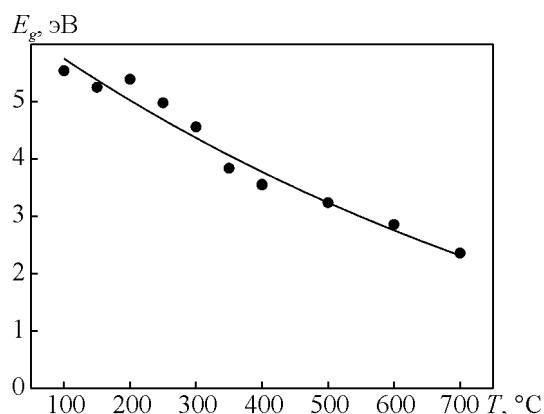


Рис. 7. Зависимость ширины запрещённой зоны E_g плёнок BC_xN_y от температуры их синтеза.

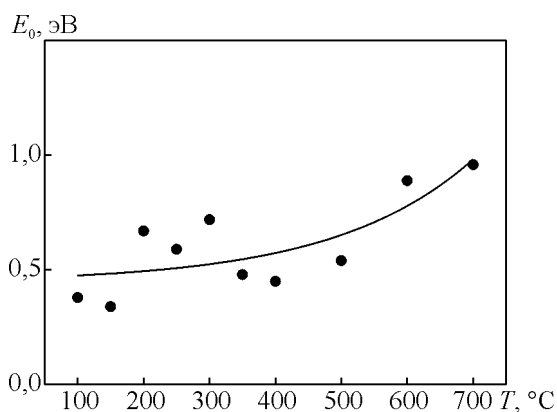


Рис. 8. Зависимость энергии Урбаха E_0 плёнок BC_xN_y от температуры их синтеза.

нов коэффициенты экстинкции, а значит, плёнка имеет более совершенную структуру. Полученные нами значения E_0 лежат в интервале 0,3 – 0,9 эВ для плёнок BC_xN_y , синтезированных в области температур 100 – 700 °С (рис. 8). Они коррелируют со значением энергии Урбаха 0,3 эВ найденным методом постоянного фототока для плёнок h -BCN, полученных в [25] индуктивно связанным плазмохимическим осаждением из газовой фазы.

Заключение

Получены плёнки карбонитрида бора составов $B_{12-20}C_{21-13}N_{41-65}O_{0-18}$ на подложках из кремния и кварцевого стекла методом плазмохимического осаждения из газовой фазы с использованием N-триметилборазина в качестве предшественника в температурном интервале 100 – 700 °С. Низкотемпературные плёнки BC_xN_y обладают высокой прозрачностью (до 93 %) в области длин волн от 400 до 2000 нм. Оптическая ширина запрещённой зоны плёнок изменяется в интервале 5,55 – 2,29 эВ, а

энергия Урбаха в интервале 0,3 – 0,9 эВ при изменении температуры синтеза от 100 до 700 °С.

Работа выполнена в рамках проекта № 68 программы 24 Президиума РАН и при частичной поддержке фонда РФФИ (проект 11-07-12067).

Литература

1. Aoki H., Masuzumi T., Watanabe D., Mazumder M.K., et al. Influence of oxygen plasma treatment on boron carbon nitride film composition. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, v. 255, p. 3635 – 3638.
2. Chen Y.M., Zeng Z.X., Yang S.R., Zhang J.Y. The tribological performance of BCN films under ionic liquids lubrication. *Diam. Related Mater.*, 2009, v. 18, p. 20 – 26.
3. Ahn H., Klimek K.S., Rie K.-T. BCN coatings by RF PACVD at low Temperature. *Surf. Coat. Technol.*, 2003, v. 174 – 175, p. 1225 – 1228.
4. Суляева В.С., Косинова М.Л., Румянцев Ю.М., Голубенко А.Н. и др. Синтез и характеристика плёнок BC_xN_y , полученных плазмохимическим разложением смеси N-триметилборазина и азота. *Неорган. матер.*, 2010, т. 46, № 5, с. 555 – 562.
5. Голубенко А.Н., Косинова М.Л., Титов А.А., Кузнецов Ф.А. Термодинамическое моделирование процесса химического осаждения BC_xN_y из смеси N-триметилборазина и водорода. *Перспективные материалы*, 2010, № 5, с. 31 – 35.
6. Stokel S., Weise K., Tamm T., Korner K.-U., Dietrich D., Marx G.. Comparative investigations of structure and properties of BCN coatings deposited by thermal and plasma-enhanced CVD. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2003, v. 375, p. 884 – 890.
7. Thamm T., Korner K.-U., Bohne W., Strub E., Rohrich J., Stockel S., Marx G. Characterization of PECVD boron carbonitride layers. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, v. 252, p. 223 – 226.
8. Косинова М.Л., Румянцев Ю.М., Голубенко А.Н., Файнер Н.И., Аюпов Б.М., Долговесова И.П., Колесов Б.А., Каичев В.В., Кузнецов Ф.А. Химический состав плёнок BC_xN_y , полученных плазмохимическим разложением триметиламинборана. *Неорганические материалы*, 2003, т. 39, № 4, с. 447 – 455.
9. Geick R., Perry C.H., Rupprecht G. Normal Modes in Hexagonal Boron Nitride. *Phys. Rev.*, 1966, v. 146, no. 2, p. 543–547.
10. Brame E.G., Margrave J.L., Meloche V.W. Infra-red spectra of inorganic solids—II oxides, nitrides, carbides, and borides *J. Inorg. Nucl. Chem.*, 1957, v. 5, p. 48 – 52.
11. Briggs D., Seah M.P. *Practical surface analysis*, v.1. Chichester: John Willey & Sons Ltd, 1995, 649 p.
12. Kim D.H., Byon E., Lee S., Kim J.-K., Ruh H. Characterization of ternary boron carbon nitride films synthesized by RF magnetron sputtering. *Thin Solid Films*. 2004, v. 447 – 448, p. 192 – 196.
13. Zhou Z.F., Bello I., Lei M.K., Li K.Y., Lee C.S., Lee S.T. Synthesis and characterization of boron carbon nitride films

- by radio frequency magnetron sputtering. Surf. Coat. Technol., 2000, v. 128 – 129, p. 334 – 340.
14. Uddin Md.N., Shimoyama I., Baba Y., Sekiguchi T., Nath K. G., Nagano M. Synthesis and characterization of oriented graphitelike B–C–N hybrid. J. Appl. Phys., 2006, v. 99, p. 084902-1 – 084902-5.
 15. Kunzli H., Gantenbein P., Steiner R., Oelhafen P. Deposition and characterization of thin boron-carbide coatings. Fresen. J. Anal. Chem., 1993, v. 346, p. 41 – 44.
 16. Diaz J., Paolicelli G., Ferrer S., Comin F. Separation of the sp^3 and sp^2 components in the C1s photoemission spectra of amorphous carbon films. Phys. Rev. B, 1996, v. 54, no. 11, p. 8064 – 8069.
 17. Scharf T.W., Ott R.D., Yang D., Barnard J.A. Structural and tribological characterization of protective amorphous diamond-like carbon and amorphous CN_x overcoats for next generation hard disks. J. Appl. Phys., 1999, v. 85, no. 6, p. 3142 – 3154.
 18. Zhou F., Adachi K., Kato K. Friction and wear behavior of BCN coatings sliding against ceramic and steel balls in various environments. Wear, 2006, v. 261, p. 301 – 310.
 19. Levy R.A., Mastromatteo E., Grow J.M., Paturi V., Kuo W.P. Low pressure chemical vapor deposition of B-N-C-H films from triethylamine borane complex. J. Mater. Res., 1995, v. 10, no. 2, p. 320 – 327.
 20. Rand J., Wensitten D.B.. Optical absorption a control test for plasma silicon nitride deposition. J. Electrochem. Soc. 1978, v.125, no. 1, p. 99 – 101.
 21. Бонч-Бруевич В.Л., Звягин И.П., Кайпер Р., Миронов А.Г., Эндерлайн Р., Эссер Б. Электронная теория неупорядоченных полупроводников. М.: Наука, 1981, 384 с.
 22. Вайнштейн И.А., Зацепин А.Ф., Кортон В.С. Особенности проявления правила Урбаха в стеклообразных материалах. Физ. хим. стекла., 1999, т. 25, № 1, с. 85 – 95.
 23. Yang Q., Wang C.B., Zhang S., Zhang D.M., Shen Q., Zhang L.M. Effect of nitrogen pressure on structure and optical properties of pulsed laser deposited BCN thin films. Surf. Coat. Technol., 2010, v. 204, p. 1863 – 1867.
 24. Lei M.K., Li Q., Zhou Z.F., Bello I., Lee C.S., Lee S.T. Characterization and optical investigation of BCN film deposited by RF magnetron sputtering. Thin Solid Films, 2001, v. 389, p. 194 – 199.
 25. Nesladek M., Vanecek M., Meykens K., Haenen K., et al. Study of UV and subgap photocurrent response in diamond and BCN thin films for detector applications. Phys. Stat. Sol. (a), 2001, v. 185, no. 1, p. 107 – 113.

Статья поступила в редакцию 2.07.2012 г.

Суляева Вероника Сергеевна — Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского Отделения РАН, младший научный сотрудник. Специалист в области материаловедения. E-mail: veronica@niic.nsc.ru.

Косинова Марина Леонидовна — Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского Отделения РАН, кандидат химических наук, заведующая лабораторией. Специалист в области физической химии и материаловедения. E-mail: marina@niic.nsc.ru.

Румянцев Юрий Михайлович — Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского Отделения РАН, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник. Специалист в области физической химии и материаловедения.

Аюпов Борис Мингареевич — Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского Отделения РАН, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник. Специалист в области исследования оптических свойств материалов. E-mail: ayupov@niic.nsc.ru.

Кеслер Валерий Геннадьевич — Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского Отделения РАН, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области физики поверхности, физики полупроводников и диэлектриков. E-mail: kesler@isp.nsc.ru.

Кузнецов Фёдор Андреевич — Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского Отделения РАН, академик РАН. Специалист в области физической химии и материаловедения. E-mail: fk@niic.nsc.ru.