

Полученные результаты позволяют предполагать значительное улучшение требуемых характеристик клапана при усовершенствовании наносимого антифрикционного покрытия и более эффективном подборе основных материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Malykote from dow corning. Руководство по выбору антифрикционных покрытий. Корпорация DowCorning, 2008. – 31 с.
2. Mohammad R. Vazirisereshk, Ashlie Martini, David A. Strubbe and Mehmet Z. Baykara, Solid Lubrication with MoS<sub>2</sub>: A Review // Lubricants, № 7(7), 57, 2019, – 35 p.
3. Bürkert fluid control systems. Пропорциональные клапаны. Обзор. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://burkert.su/page-downloads>. – (Дата обращения : 10.03.2021).
4. Щучинский С. Х. Электромагнитные приводы исполнительных механизмов. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 152 с., ил.
5. Пропорциональные клапаны ASCO™ Preciflow серии 202. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.emerson.ru/ru-ru/catalog/automation-solutions-ru-ru/fluid-control-pneumatics/microfluidic-valves/asco-202-preciflow-ru-ru>. – (Дата обращения : 07.05.21).
6. AWM700 Series Airflow Sensors. Installation instruction. Honeywell International Inc., march 2010.

#### ПОЛУЧЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

#### FORMATION OF DIFFERENT STRUCTURES BY THE METHOD OF RAPID THERMAL PROCESSING

**А.С.Ковалева, С.П.Бычков**

**A.S.Kovaleva, S.P.Bychkov**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

*В работе рассмотрены различные структуры, получаемые методом быстрой термической обработки (БТО). Описаны процессы их получения, необходимые температурные режимы, особенности физико-химических превращений. Выделены температурные зоны БТО, проведена оценка требуемых мощностных характеристик нагревательного устройства для получения заданной температуры.*

*This article discusses various structures produced by Rapid Thermal Processing (RTP). The processes of their preparation, the required temperature conditions, and the features of physical and chemical transformations are described. The temperature zones of the RTP are identified, and the required power characteristics of the heating device are assessed to obtain the given temperature.*

*Ключевые слова: быстрая термическая обработка, БТО, тонкие плёнки.*

*Key words: Rapid Thermal Processing. RTP, thin films.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Быстрая термическая обработка (БТО) – процесс производства полупроводниковых или легированных структур, при котором обрабатываемая подложка, на поверхности

которой происходят требуемые физико-химические превращения, нагревается до высоких температур (в диапазоне от 250 до 1500° С) в течение нескольких секунд.

Процессы БТО используются в процессах высоко-градиентного легирования, термического окисления, химического осаждения из газовой фазы, оплавления металла. В последнее время активно исследуется применение метода БТО для получения различных высокоэффективных фотоэлектрических покрытий; структур, используемых для солнечных батарей; структур, используемых для фотоэлектроники и оптоэлектроники.

## МОЩНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА БТО

Требуемая рабочая температура на поверхности подложки позволяет оценить необходимые удельные мощностные характеристики нагревательного устройства через величину требуемой поверхностной плотности результирующего потока излучения  $Q_{рез}$  на холодной подложке в начале нагрева (рис. 1) в камере с высоким значением коэффициента излучения с холодными стенками. Эти значения могут рассматриваться как максимальные, так как для реальных взаимодействующих серых поверхностей с температурами, отличными от температуры окружающей среды, требуемые подводимые мощности будут несколько ниже. Для их определения требуется решать задачу лучистого теплообмена применительно к каждой конкретной расчетной схеме.

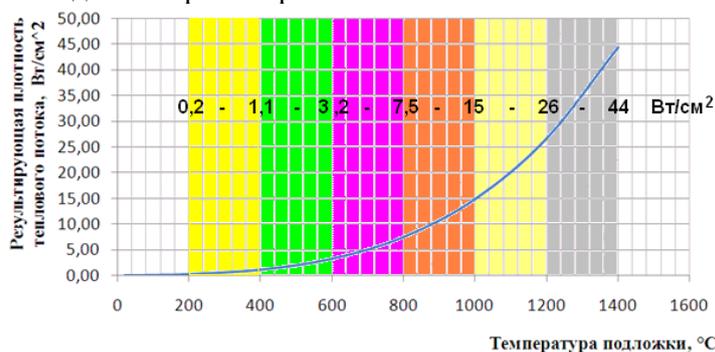


Рис. 1. Зависимость требуемой удельной результирующей мощности на поверхности подложки от максимальной температуры ее нагрева.

## ОБЗОР СТРУКТУР, ПОЛУЧАЕМЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ БТО

Рассмотрим некоторые актуальные виды покрытий, получаемых методом БТО в разных температурных диапазонах.

### 1. НАГРЕВ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ 400 ДО 600°С ( $Q_{рез}$ ОТ 1,1 ДО 3,2 ВТ/СМ<sup>2</sup>)

Структуру SnS, используемую в оптоэлектронике, можно получить [1] нанесением слоя сульфида олова (SnS) со слоями Sn/Mo/стекло и последующей БТО. Сера подвергается термическому крекингу и используется для образования поликристаллической пленки SnS из прекурсора Sn при заранее установленном давлении в трубке БТО. Сульфуризацию проводят при температуре от 200°С до 500°С в течение 10...40 мин. При  $T \leq 300$  °С и  $t = 20$  мин выращиваются тонкие пленки SnS p-типа, которые показывают лучшее процентное соотношение  $[S]/[Sn] \cong 1$  и предпочтительную ориентацию [111].

Быстрая термическая обработка влияет на структурно-фазовые переходы в системе Pt-Si при формировании силицида платины. В работе [2] в качестве образцов использовались пленки Pt толщиной 43,7 нм, нанесенные на подложки монокристаллического кремния КЭФ 0.5 ориентации (111) путем магнетронного распыления мишени из платины с чистотой 99,95% с криогенной откачкой до давления не хуже  $5 \cdot 10^{-5}$  Па. В качестве рабочей среды использовался аргон, чистота которого составляла 99,933%. БТО проводилась в среде азота в диапазоне температур от 200 до 550

°C с шагом 50 °C и 7 сек. В диапазоне температур  $200^{\circ}\text{C} \leq T \leq 300^{\circ}\text{C}$  за 7 с процесса БТО на границе металлической пленки с подложкой происходит образование слоя  $\text{Pt}_2\text{Si}$  за счет диффузии атомов Pt в кремний через слой растущего силицида. При  $T=300^{\circ}\text{C}$  происходит полное использование пленки Pt за 7 с в процессе образования однофазной системы  $\text{Pt}_2\text{Si}$ . При  $350^{\circ}\text{C} \leq T \leq 450^{\circ}\text{C}$  регистрируется формирование двухфазной системы  $\text{Pt}_2\text{Si} \rightarrow \text{PtSi}$ , начиная от межфазной границы Si/ $\text{Pt}_2\text{Si}$  преимущественно за счет встречной диффузии атомов Si в слой  $\text{Pt}_2\text{Si}$ . При  $T=450^{\circ}\text{C}$  образуется термостабильная равновесная структура PtSi по всей толщине силицида. Это на 50–100 °C ниже и значительно быстрее, чем при длительной равновесной термообработке.

Наиболее распространенным методом производства в промышленности **CIGS** ( $\text{Cu(InGa)Se}_2$ ) является осаждение пленок прекурсора Cu-In-Ga и их реакция, которая называется селенизацией, с газовой фазой  $\text{H}_2\text{Se}$  при 450–550 °C в течение 60 минут или дольше, Селенизация с помощью БТО характеризуется улучшенной производительностью процесса [3].

Методика изготовления **CGS-пленки** ( $\text{CuGaSe}_2$ ) заключается в нанесении слоев Cu, Ga и Se на натриево-известковое стекло с молибденовым покрытием и последующим отжигом прекурсора в печи БТО [4]. Для осаждения элементов используется термическое испарение. Достаточно времени отжига в пять минут при температуре 550°C, чтобы превратить прекурсор в однофазную CGS-пленку (рис. 2).

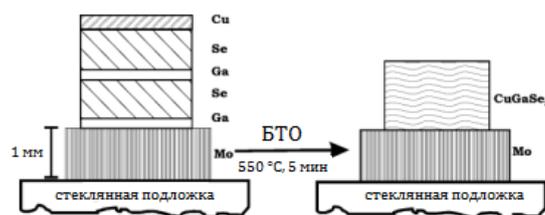


Рис. 2. Превращение прекурсора в однофазную CGS-плёнку при БТО [4].

Тонкие пленки  **$\text{Cu(In,Ga)Te}_2$  (CIGT)**, легированные Na, были выращены двухстадийным методом [5]. На первой стадии процесса слои прекурсора формировались на подложках из нержавеющей стали, покрытых Mo, путем электроосаждения Cu, In и Ga и испарения пленки NaF в качестве легирующей примеси и Te. На втором этапе наборы плёнок фольга/Mo/(Cu, In,Ga)/NaF/Te реагировали посредством БТО. Скорость нарастания до температуры реакции  $T=600^{\circ}\text{C}$  изменяли от 0,5 до 10 °C/с. Было оценено влияние скорости изменения температуры на качество пленки. Обнаружено, что вторая фаза InTe, обнаруженная в плёнках, прореагировавших при скорости изменения температуры 0,5–5°C/с, не присутствовала в пленках, прореагировавших при скорости изменения температуры 10°C/с. Морфология пленки образца с высокой скоростью нагрева показала улучшенную кристалличность и размер зерна. Градация галлия была обнаружена во всех слоях независимо от скорости изменения температуры, причем поверхность пленок была более богата индием.

Тонкие плёнки  **$\text{CuSbS}_2$**  возможно получить отжигом и быстрой термической обработкой слоёв  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ –Cu прекурсора в различных условиях [6]. Тонкие плёнки  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  (200 нм) наносились химическим осаждением из раствора, содержащего  $\text{SbCl}_3$  и  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ . Слои меди были нанесены термическим испарением на тонкие плёнки  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ . Режим термообработки включал отжиг при 380°C и БТО при 500/600°C. Показано, что обычный отжиг в вакуумной печи приводит к образованию примесной фазы  $\text{Cu}_2\text{S}$  вместе с  $\text{CuSbS}_2$  на стеклянных подложках, которая исчезает при применении БТО выше 500°C. Наибольшие значения фототока также характерны для образцов, изготовленных методом БТО (рис. 3). Ток, протекающий через образец, измеряли с интервалом 20с, сначала в темноте, затем с освещением образца и после выключения освещения.

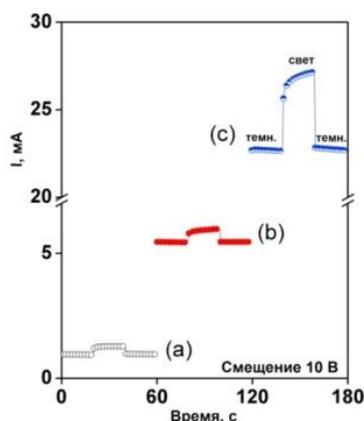


Рис. 3. Кривые отклика фототока для тонких пленок  $\text{CuSbS}_2$  (CAS Cu-50), сформированных при различных условиях [6]: а) отжиг при  $380^\circ\text{C}$  в течение 1 ч в вакууме; б) БТО при  $600^\circ\text{C}$  в течение 5 мин; в) отжиг с БТО при  $600^\circ\text{C}$  в течение 5 мин.

В работе [7] при формировании системы поликристаллической фоточувствительной пленки дисилицида титана  $\text{TiSi}_2$  в модификации С49 методом БТО проводилась химическая очистка подложки кремния в буферном травителе на основе HF, затем пластины кремния подвергались ионной очистке в атмосфере аргона на глубину 5 нм. Далее на подложку кремния, имеющего ориентацию (001), методом магнетронного нанесения на последовательно осаждались пленки титана и нитрида титана на эпитаксиальный слой кремния n-типа, сформированный на подложке из кремния марки КДБ-12. Затем проводилась БТО с использованием галогенных ламп. Время обработки составляло 30 с при температуре  $600^\circ\text{C}$ .

Тонкие плёнки  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  могут быть сформированы методом БТО [8] поверх покрытого оксидом олова и легированного фтором боросиликатного стекла. Сначала тонкие плёнки железа формируются физическим осаждением из газовой фазы (при давлении  $5 \cdot 10^{-7}$  мбар), затем тонкие плёнки F были преобразованы в тонкие плёнки  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  методом БТО (нагреватели типа ГЛН) на воздухе. Для каждого образца температура повышалась от комнатной до соответствующей температуре окисления  $T_{\text{ок}}$  за 100 с, затем поддерживалась постоянной на время  $t_{\text{ок}}$ , которое варьировалось от 1 с до 120 с, затем образцы остужались на воздухе. Температуру контролировали во время процесса с помощью термопары на обратной стороне подложки. Комнатная температура снова была достигнута в течение 300 с. Для полученных плёнок был измерен фототок, выяснено, что наибольшее значение фототока достигается при БТО при  $750^\circ\text{C}$  (рис. 4).

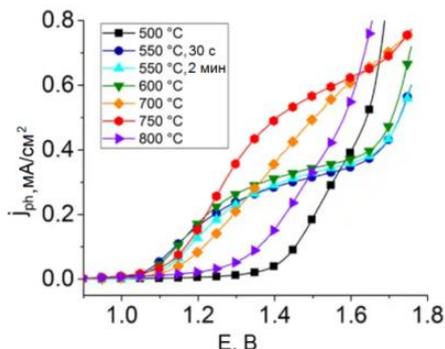


Рис. 4. Плотность фототока  $j_{\text{ph}}$  как функция электрохимического потенциала  $E$  для пленок  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  толщиной 40 нм [8].

## 2. НАГРЕВ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ 600 ДО 800°C ( $Q_{PEZ}$ ОТ 3,2 ДО 7,5 ВТ/CM<sup>2</sup>)

Один из способов изготовления фазово-чистых фотоэлектродов  $CuBi_2O_4$  [9] – комбинирование импульсного лазерного осаждения (PLD) для последовательного осаждения бинарных оксидов  $Bi_2O_3$  и  $CuO$  на подложки FTO (оксид фтора и олова) с БТО для проведения реакции



БТО пленок FTO/ $Bi_2O_3$ / $CuO$  (рис. 5) приводит к образованию фазово-чистых пленок  $CuBi_2O_4$ , тогда как нагрев аналогичных пленок в течение 72 часов с использованием обычного печного нагрева – нет (рис. 6).

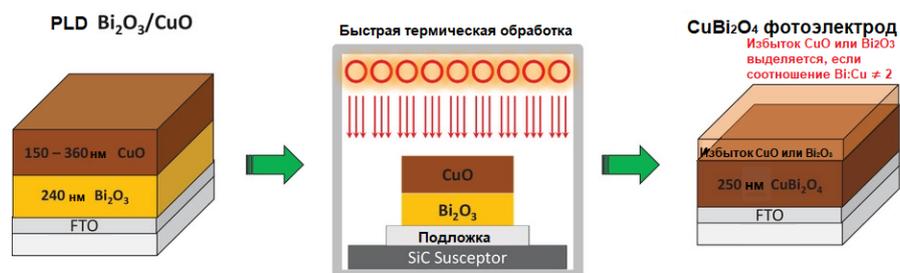


Рис. 5. Получение структуры  $CuBi_2O_4$  методом комбинирования PLD и БТО [9].

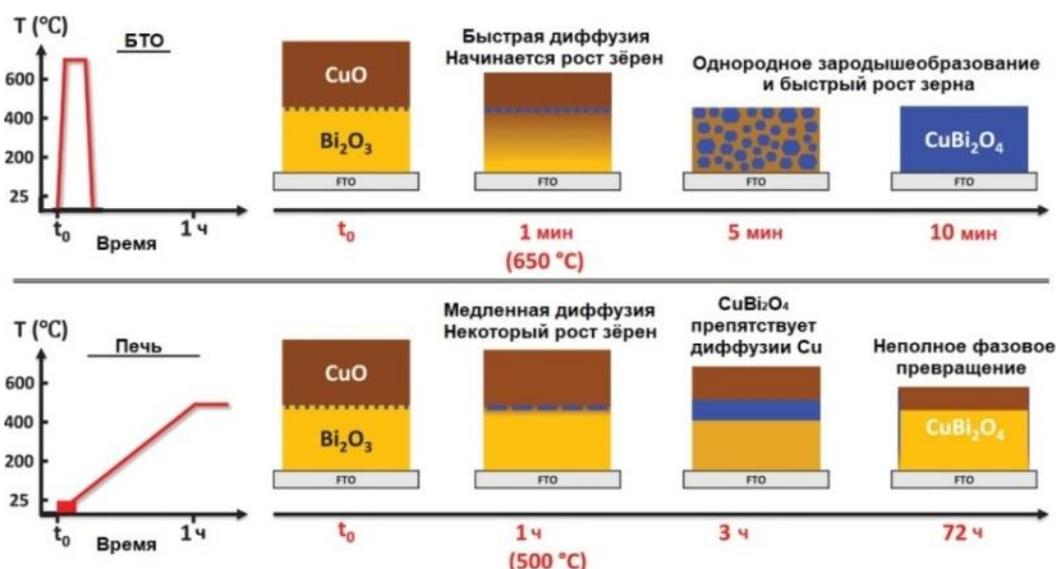


Рис. 6. Сравнение процессов получения структуры  $CuBi_2O_4$  методом комбинирования PLD и БТО и методом обычного печного нагрева [9].

Низкотемпературные твердооксидные топливные элементы (LT-SOFC) из  $BaZr_{0.8}Y_{0.2}O_{3-\delta}$  получают методом химического осаждения из раствора с БТО при  $T=700^\circ C$  [10]. Плёнки выращиваются на монокристаллических пластинах сапфира (ориентация (0001)). Подложки покрываются центрифугированием химическим раствором при скорости 3000 об/мин в течение 60с. После этого подложки с покрытием сушатся на горячей плите при  $300^\circ C$  в течение 10 мин для пиролиза. Затем образцы быстро спекаются в предварительно нагретой трубчатой печи.

## 3. НАГРЕВ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ 800 ДО 1000°C ( $Q_{PEZ}$ ОТ 7,5 ДО 15 ВТ/CM<sup>2</sup>)

Пленки  $BaZrS_3$  можно получить путем реактивного совместного распыления пленок прекурсора Ba-Zr-S при температуре окружающей среды с последующей термообработкой для стимулирования кристаллизации. В работе [11] проводили магнетронное напыление, магнетроны были повернуты к подложке под углом  $45^\circ$ ,

находились на расстоянии 160 мм от подложки. Подавался импульсный постоянный ток с частотой 20 кГц на мишень из Zr (чистота 99,9%; диаметр 102 мм; толщина: 6 мм), в то время как ВЧ-генератор с частотой 13,56 МГц питал мишень BaS (чистота 99,9%; диаметр 102 мм; толщина 3 мм), прикрепленную к опорной пластине толщиной 3 мм. Они одновременно работали на постоянной мощности 320 Вт (Zr) и 160 Вт (BaS). Рабочее давление - около  $8 \cdot 10^{-4}$  Па. H<sub>2</sub>S чистотой 99,5% и Ar подавали одновременно, с расходом 7 и 18 м<sup>3</sup>/с соответственно. Время напыления на пластины монокристаллического кремния толщиной 300 мкм и диаметром 50 мм – 3 ч. Вращение подложки включалось только в некоторых случаях - при выключенном вращении создаются полезные градиенты. После распыления образцы выгружали в заполненный азотом мешок, герметично закрывали и хранили до отжига. Процесс напыления настраивали так, чтобы соотношение составов  $[Ba]/([Ba]+[Zr])$  находилось в диапазоне 45–55%, при соотношении  $[S]/([S]+[Ba]+[Zr])$ , близком к 60 %. Нагрев методом БТО: на пластине подложкодержателя отжиг в быстродействующем термическом реакторе в атмосфере N<sub>2</sub>. Скорость роста температуры 73°C/с, температура от 700 до 1000°C, время отжига 1 мин (рис. 7). Процесс охлаждения происходил на месте, при выключении ГЛН. Было выявлено, что оптимальная температура для БТО при получении плёнок BaZrS<sub>3</sub> составляет 800 – 900°C.

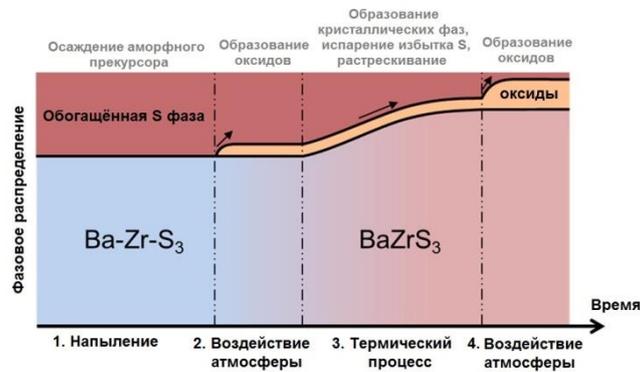


Рис. 7. Стадии образования плёнки BaZrS<sub>3</sub> [11].

Плёнки из сплава с высокой энтропией **Cu/CrNiO/FeCo** получают методом БТО [12]. Многослойные слои общей толщиной 760 нм, состоящие из 16 повторов последовательности Cu (11 нм)/CrNiO (16,5 нм)/CoFe (20 нм), отжигаются при температурах от 600°C до 1000°C в течение 5 мин (рис. 8). Дуплексная структура FCC, содержащая CrCoFeNiO HEA и чистую фазу Cu, была успешно синтезирована при 600°C и 800°C с помощью твердотельной реакции. CuCrCoFeNiO HEA образуется в нанокристаллической матрице Cu (рис. 9). По мере увеличения температуры отжига содержание кислорода в пленках уменьшалось.

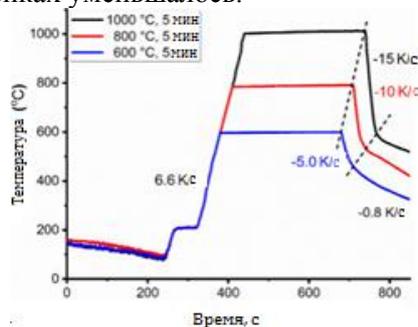


Рис. 8. Режимы БТО при выращивании структуры Cu/CrNiO/FeCo [12].

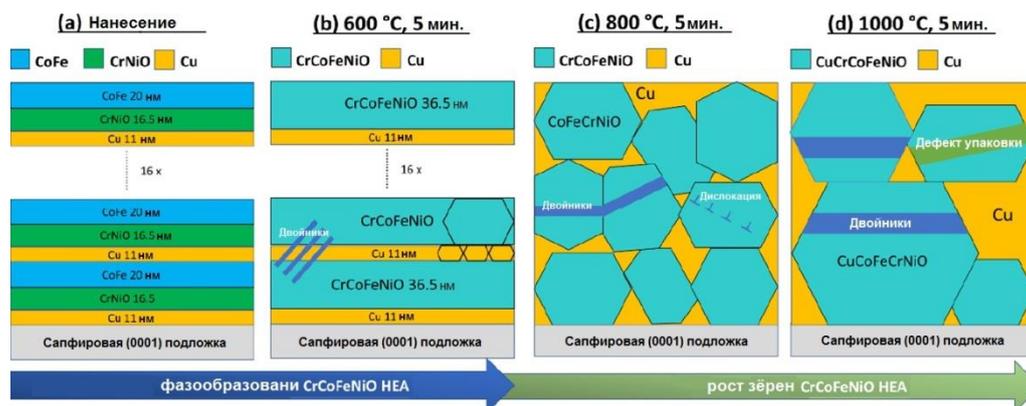


Рис. 9. Этапы выращивания структуры Cu/CrNiO/FeCo [12].

Пленка люминофора  $Zn_3(VO_4)_2$  на кварцевой подложке, работающая в ближнем УФ, изготавливается методом ВЧ-магнетронного напыления при 150 °C или комнатной температуре с последующей БТО при 600–900 °C [13]. В этом случае люминофор демонстрирует широкий спектр излучения с пиком при 567 нм и полушириной 186 нм. Наивысшая внутренняя квантовая эффективность 45% может быть получена после прокаливания при температуре 800 °C плёнки, осажденной при 150 °C, с молярным отношением Zn/V, равным 1,9. Прокаливание при 800 °C способствует термической коалесценции и эффективно уменьшает поверхностные ловушки  $Zn_3(VO_4)_2$  частицы. При изготовлении плёнки подвергаются термическому кальцинированию с помощью БТО в атмосфере  $O_2$  1000 Па при 500 – 900 °C в течение 5 мин, а затем быстро закаляются до комнатной температуры [13].

Тонкие плёнки  $MoS_2$ , используемые в оптоэлектронике и электронике, получают методом БТО с использованием тонкой пленки напыленного молибдена (Mo) и пленки термически испаренной серы (S) [14]. Исследования показали улучшение однородности тонких плёнок  $MoS_2$  с увеличением расхода газа  $H_2$  (рис. 10). Обнаружена основная роль атомов водорода в процессе осаждения. Для изучения влияния подложки пленки  $MoS_2$  выращивались как на подложках Si, так и на подложках  $SiO_2/Si$ . Тонкие пленки  $MoS_2$ , выращенные с использованием  $H_2$  со скоростью напуска 20 м<sup>3</sup>/с при БТО при 800 °C показали лучшие микроструктурные свойства.



Рис. 10. Схема процесса изготовления тонких плёнок  $MoS_2$  [14].

Возможно получение структуры  $AgSb(S_xSe_{1-x})_2$  путем БТО предварительно отожженных слоистых структур  $Sb_2S_3/Ag/Se$  [15]. Метод получения: тонкие плёнки  $Sb_2S_3$  наносятся методом химического осаждения из ванны, а Ag – термическим испарением. Слоистые прекурсоры серебра ( $Sb_2S_3/Ag$ ) погружаются в раствор  $Na_2SeSO_3$  с последующим отжигом и быстрой термической обработкой.

При получении графена методом БТО [16] пленки меди напыляются на подложку  $SiO_2/Si$  толщиной 500 нм. После отжига медных пленок при 950 °C твердый источник углерода (такой, как полиметилметакрилат (PMMA) или сахароза) наносится центрифугированием поверх пленки. Процесс БТО проводится со скоростью нагрева

160°C/с. После выдерживания при температуре 800-1000°C в течение 4-8 минут образец охлаждают до комнатной температуры примерно за 30 минут (рис. 9а). После этого поверхность медной пленки образует аморфный углерод. На границах раздела Cu-SiO<sub>2</sub> имеется монослойный графен большой площади. Слой Cu вместе с α-C окончательно растворяется в 0,1 М растворе FeCl<sub>3</sub>. Однослойный графен, сформированный непосредственно на пластине SiO<sub>2</sub>/Si, получается без каких-либо дополнительных процессов (рис. 9.б).

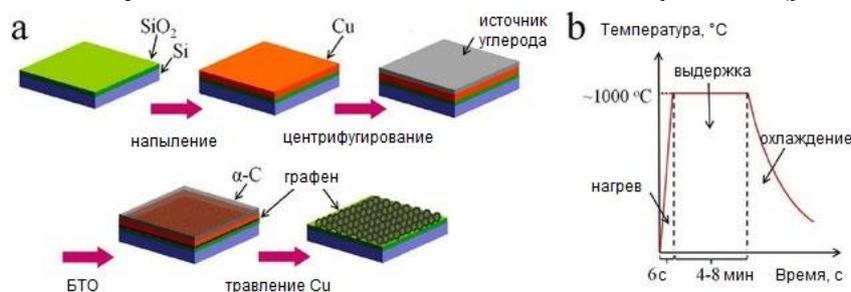


Рис. 11. Получение графена методом БТО: *a* – процесс получения графена; *b* - процессы нагрева, каскадирования и охлаждения.

В таблице 1 представлены сводные данные по режимам БТО структур, упомянутых в данном обзоре.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен обзор различных наноструктур, формируемых посредством быстрой термической обработки (БТО).

Представлено разделение температурных зон при БТО по уровню требуемой удельной мощности при нагреве. При нагреве в системах поверхностей со значительным отражением требуемая мощность будет заметно ниже, эти системы требуют индивидуального расчета для каждой конкретной схемы.

В выделенных температурных зонах рассмотрены способы получения с помощью БТО и описаны используемые в способах режимы для таких структур, как структуры солнечных батарей Cu(InGa)Se<sub>2</sub>, CuGaSe<sub>2</sub>, Cu(In,Ga)Te<sub>2</sub>, BaZrS<sub>3</sub>; структуры фото-/оптоэлектроники SnS, CuSbS<sub>2</sub>, MoS<sub>2</sub>, CuBi<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Zn<sub>3</sub>(VO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>; силициды титана TiSi<sub>2</sub>(C49) и платины PtSi; графен и др (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BaZr<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>O<sub>3-δ</sub>, Cu/CrNiO/CoFe, AgSb(S<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>).

Представлено качественное отличие метода БТО по сравнению с обычным печным нагревом. Например, применение метода БТО значительно повышает фототок для тонких пленок CuSbS<sub>2</sub>, а для пленок FTO/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CuO приводит к образованию фазово-чистых пленок CuBi<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, тогда как нагрев аналогичных пленок в течение 72 часов с использованием обычного печного нагрева не дает таких эффектов.

Представленные результаты могут быть использованы в качестве справочных материалов при расчете и проектировании вакуумно-термических установок быстрой термической обработки.

Таблица 1.

## Применение БТО для формирования различных структур

Соединение	Применение	Хим. реакция	Температура	Скорость нагрева	Время нагрева	Давление, Па	Газ	Тип нагревателя
400 – 600°C								
SnS [1]	оптоэлектроника	SnS + Sn/Mo/стекло → SnS	200 – 500 °C		Выдержка 10...40 мин	–	–	–
PtSi [2]	интегральные микросхемы (материал низкоомных контактов)	Pt <sub>2</sub> Si → PtSi	200 – 550 °C	Шаг изменения температуры 50 °C	7с	–	N <sub>2</sub>	–
Cu(InGa)Se <sub>2</sub> [3]	солнечные батареи	Cu-In-G прекурсоры	450–550 °C	–	–	–	Смесь газов H <sub>2</sub> Se/Ar	ГЛН
CuGaSe <sub>2</sub> [4]	солнечные батареи	Cu-Ga-Se прекурсоры	550°C	–	5 мин	–	–	–
Cu(In,Ga)Te <sub>2</sub> , легированные Na [5]	солнечные батареи	фольга/Mo/(Cu, In,Ga)/NaF/Te → CuGaSe <sub>2</sub>	600 °C	от 0,5 до 10 °C/с		–	–	–
CuSbS <sub>2</sub> [6]	фотоэлектрические устройства	порошок трихлорида сурьмы (SbCl <sub>3</sub> , 99,99%), порошок пентагидрата тиосульфата натрия (Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 5H <sub>2</sub> O, 99,99%) и ацетон	500 – 600 °C	–	14с нагрева, 5 мин выдержка	1,33·10 <sup>2</sup>	–	ГЛН
TiSi <sub>2</sub> (C49) [7]	фотоприемники для видимой и УФ областей спектра	–	600 °C	–	30 с	–	–	ГЛН
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [8]	фотокаталитические и фотохимические устройства	–	от 500 °C до 800 °C	–	нагрев -100с, выдержка 120с	5·10 <sup>-5</sup>	–	ГЛН
600 – 800°C								
CuBi <sub>2</sub> O <sub>4</sub> [9]	фотокатод	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + CuO → CuBi <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	650 °C	10 °C /с	10 мин	–	O <sub>2</sub>	ГЛН
BaZr <sub>0,8</sub> Y <sub>0,2</sub> O <sub>3-δ</sub> [10]	низкотемпературные твердооксидные топливные элементы (LT-SOFC)	–	700 °C	–	–	–	–	–
800 – 1000°C								
BaZrS <sub>3</sub> [11]	солнечные батареи	Ba–Zr–S прекурсоры	700 – 1000°C	73°C/с	1 мин	–	N <sub>2</sub>	–
Cu/CrNiO/CoFe [12]	«плёнки из сплава с высокой энтропией»	16 повторов - последовательно Cu-11нм /CrNiO-16,5нм/CoFe-20нм	600°C, 800°C, 1000°C	6.6 °C /с	5 мин 600°C, 5 мин 800°C, 5 мин 1000°C	–	Ar/H <sub>2</sub>	ГЛН
Zn <sub>3</sub> (VO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> [13]	светодиоды	–	600–900°C	–	5 мин	10 <sup>3</sup>	O <sub>2</sub>	–
MoS <sub>2</sub> [14]	электроника, оптоэлектроника	–	800 °C	8 °C/с	5 мин	2,66·10 <sup>2</sup>	Ar, H <sub>2</sub>	–
Графен [15]		–	800 – 1000°C	160°C/с	Нагрев 6с, выдержка при 800–1000 °C 4-8 мин	–	–	–

## ЛИТЕРАТУРА

1. Shim J. H., Kim J. Study of Growth and Temperature Dependence of SnS Thin Films Using a Rapid Thermal Processing //Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. – 2016. – Т. 29. – №. 2. – С. 95-100.
2. Пилипенко В. А. и др. Структурно-фазовые переходы в системе Pt–Si при быстрой термообработке //Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2020. – Т. 64. – №. 2. – С. 238-244.
3. Lovelett R. J. et al. Design and experimental implementation of an effective control system for thin film Cu (InGa) Se<sub>2</sub> production via rapid thermal processing //Journal of Process Control. – 2016. – Т. 46. – С. 24-33.
4. Klenk M. et al. CuGaSe<sub>2</sub> BASED THIN FILM SOLAR CELLS FABRICATED BY RAPID THERMAL PROCESSING.
5. Erkan S. et al. Cu (In, Ga) Te<sub>2</sub> film growth by a two-stage technique utilizing rapid thermal processing //Semiconductor Science and Technology. – 2019. – Т. 34. – №. 3. – С. 035011.
6. Vinayakumar V. et al. CuSbS<sub>2</sub> thin films by rapid thermal processing of Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-Cu stack layers for photovoltaic application //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2017. – Т. 164. – С. 19-27.
7. Маркевич М. И., Стельмах В. Ф., Чапланов А. М. Использование полупроводниковых свойств некоторых модификаций силицидов титана, полученных методом быстрой термической обработки, для создания фотоприемников //Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – С. 8.
8. Wickman B. et al. Iron oxide films prepared by rapid thermal processing for solar energy conversion //Scientific reports. – 2017. – Т. 7. – №. 1. – С. 1-9.
9. Gottesman R. et al. Pure CuBi<sub>2</sub>O<sub>4</sub> photoelectrodes with increased stability by rapid thermal processing of Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CuO grown by pulsed laser deposition //Advanced Functional Materials. – 2020. – Т. 30. – №. 21. – С. 1910832.
10. Xie H. et al. Rapid thermal processing of chemical-solution-deposited yttrium-doped barium zirconate thin films //Surface and Coatings Technology. – 2017. – Т. 320. – С. 213-216.
11. Comparotto C. et al. Chalcogenide Perovskite BaZrS<sub>3</sub>: Thin Film Growth by Sputtering and Rapid Thermal Processing //ACS Applied Energy Materials. – 2020. – Т. 3. – №. 3. – С. 2762-2770.
12. Wang A. et al. Formation of CuCrCoFeNiO high entropy alloy thin films by rapid thermal processing of Cu/CrNiO/FeCo multilayers //Surface and Coatings Technology. – 2021. – Т. 405. – С. 126563.
13. Kawashima T., Washio K. Rapid synthesis of Zn<sub>3</sub>(VO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> phosphor film on quartz substrate by RF magnetron sputtering and rapid thermal processing //Ceramics International. – 2017. – Т. 43. – №. 12. – С. 9267-9271.
14. Pradhan D. et al. Modulation of microstructural and electrical properties of rapid thermally synthesized MoS<sub>2</sub> thin films by the flow of H<sub>2</sub> gas //Superlattices and Microstructures. – 2020. – Т. 145. – С. 106598.
15. Rodriguez Vela D. L. et al. AgSb (S<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub> thin films by rapid thermal processing of Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>/Ag/Se thin films for photovoltaic applications //physica status solidi (c). – 2016. – Т. 13. – №. 1. – С. 47-52.
16. Wu Z. et al. A fast transfer-free synthesis of high-quality monolayer graphene on insulating substrates by a simple rapid thermal treatment //Nanoscale. – 2016. – Т. 8. – №. 5. – С. 2594-2600.