

образом, с увеличением дозы бора степень разупорядоченности приповерхностной области снижается, и учитывая вакансионный механизм диффузии иттербия, следует ожидать замедления его миграции к поверхности.

Замедление диффузии Yb к поверхности наблюдалось также и в Si:Yb,P (рисунок 3). Однако оно носило качественно другой характер, чем в образцах Si:B. В процессе ТО $T = 450^\circ\text{C}$ наблюдается слабое смещение профиля распределения Yb к поверхности. Повышение температуры отжига усиливает миграцию лантаноида, однако, на глубине соответствующей проецированному пробегу остается четко выраженный пик, интенсивность которого с увеличением длительности ТО снижается. При этом профиль распределения иттербия со стороны объема пластины практически не претерпевает изменений, основная часть примеси движется к поверхности. В данном случае имеет место взаимодействие атомов Yb и P с образованием комплексов, включающих в свой состав атомы обеих примесей. Данные комплексы, вероятно, не создают в кремнии значительных полей упругих напряжений и поэтому их движение в кристалле маловероятно.

При облучении быстрыми нейтронами, образующиеся вакансии и их комплексы, эффективно стимулируют процесс диффузии атомов редкоземельных примесей [1]. Вероятно, при $T = 450^\circ\text{C}$ миграция атомов Yb к поверхности вызвана радиационно-стимулированной диффузией по вакансионному механизму. Направленность диффузии обусловлена как упругими напряжениями несоответствия, образующимися при имплантации PЗЭ, так и влиянием поверхности пластины. Миграция атомов лантаноида приводит к снятию указанных напряжений. При более высоких температурах ($T = 600$ и 950°C) вследствие малости коэффициента сегрегации примеси имеет место образование узкого сегрегационного пика

концентрации в аморфной фазе перед фронтом рекристаллизации и оттеснение ее вместе с фронтом рекристаллизации к поверхности. Известно [4, 5], что в слое α -кремния вблизи фронта рекристаллизации коэффициент диффузии примеси PЗЭ Eg более чем на 3 порядка может превышать аналогичное значение для монокристалла. Зависимость эффективности движения иттербия к поверхности от величины дозы внедренного бора отражает тот факт, что кроме миграции под действием упругих сил и смещения вместе с фронтом рекристаллизации, при $T=950^\circ\text{C}$ имеет место и вакансионный механизм диффузии лантаноида. При дополнительном внедрении фосфора миграция PЗЭ к поверхности менее заметна вследствие формирования комплексов, включающих в свой состав атомы P и Yb.

Установлено, что в процессе высокотемпературной ТО наблюдается движение внедренной примеси PЗЭ к поверхности, причем в случае дополнительной имплантации бора данная миграция существенна уже при $T = 450^\circ\text{C}$, когда рекристаллизации еще не происходит. При $T > 600^\circ\text{C}$ характер миграции к поверхности примесей PЗЭ в значительной степени зависит от условий дополнительного внедрения основных легирующих примесей. При дополнительном внедрении бора эффективность движения замедляется с увеличением дозы.

Литература

1. Гусаков В.Е и др. // Электронная техника. Сер.6. Материалы. – 1989. – №.4 – С.29-32.
2. Петров В.В. и др. // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1993. – № 1. – С.86-88.
3. Odzhaev V.B. et al // J.Applied Physics A. – 1996. – V. A62. – P. 355-358.
4. Custer J.S. et al // Journal of Applied Physics. – 1994. – V.75, № 6. – P.2809- 2817.
5. Polman A. et al // Journal of Applied Physics. – 1997. – V.81, № 1. – P.150-153.

УДК 621.32+53.087.351+535.21:(667.635+667.637)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ КРАСОК

Рыжевич А.А.¹, Митьковец А.И.¹, Смирнов А.Г.¹, Машенко А.Г.¹, Железнякова Т.А.^{1,2},
Гореленко А.Я.³, Захарич М.П.³

¹Институт физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

³Республиканское научно-техническое унитарное предприятие «КРИПТОТЕХ» Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

Для проведения экспериментальных исследований в рамках научно-исследовательской работы «Фотонная сушка токопроводящих красок. Шифр «ФСТК» по договору № 531 «ФСТК» от 20 апреля 2016 г. были скомплектована и смонтированы две экспериментальные установки. Первая установка для исследования процессов

ФСТК была создана на основе мощной импульсной ксеноновой лампы (рисунок 1) и собрана по модульному принципу на колесном шасси 1. На верхней огражденной полке закреплен блок питания 2 типа БПЛ 66/33У или БПЛ 75/33У. Ниже внутри каркаса шасси установлена подвижная рама 3, к которой регулировочными

шпильками прикреплен излучатель 4, содержащий ксеноновую лампу. Под излучателем на выносных кронштейнах установлен электромеханический позиционер (ЭМП), содержащий блок питания и управления 5.1, оптический рельс 5.2, универсальную каретку 5.3 и реверсивный двигатель 5.4. На нижней полке установлен двухконтурный блок охлаждения 6 типа вода-вода, осуществляющий прокачку дистиллированной воды через излучатель 4 с ксеноновой лампой.

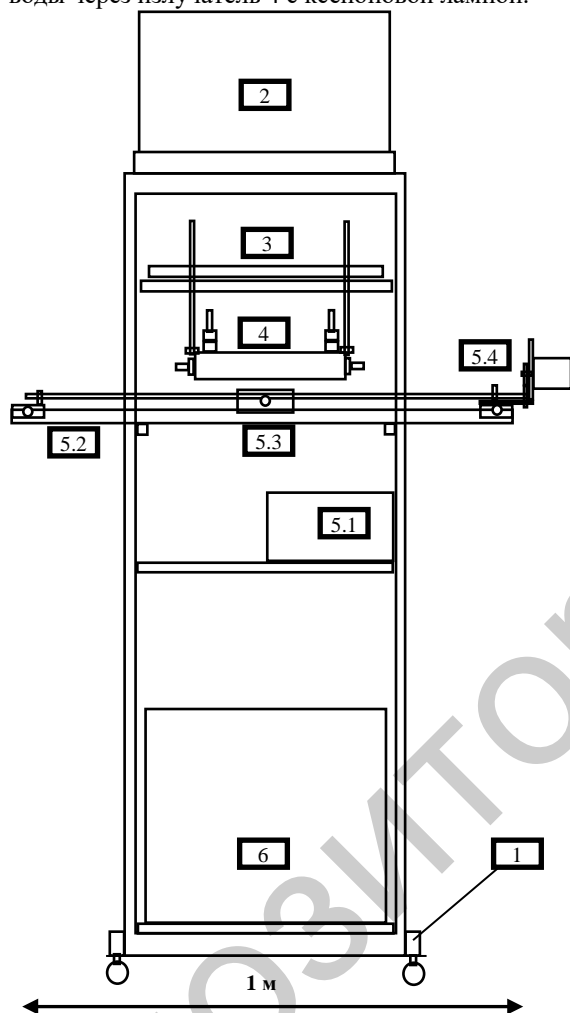


Рисунок 1 – Компоновка экспериментальной установки (пронумерованные позиции названы и/или описаны в тексте)

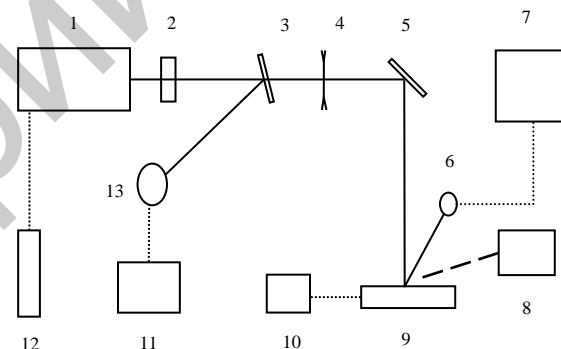
С целью увеличения КПД излучателя для него был изготовлен светоотражающий кожух, состоящий из двух слоев листового металла (верхний, корпусный, из нержавеющей стали, а нижний – отражающий, из шлифованного алюминиевого сплава). Благодаря наличию отражающего кожуха выход излучения в направлении образца увеличивается более чем в 2 раза. Параллельно кожух выполняет также и защитные функции (защита органов зрения от мощного светового излучения, защита от разлета осколков при возможном взрыве лампы с разрушением трубки из кварцевого стекла,

защита трубки от оседания пыли и возможных механических повреждений).

Созданная экспериментальная установка генерирует импульсы электромагнитного излучения с энергией 75 Дж и с частотой следования, дискретно задаваемой блоком питания: 1, 3, 5, 10, 25, 50 Гц. Скорость перемещения каретки ЭМП зависит от коэффициента редукции используемого двигателя. Оптимальным при полученных энергетических характеристиках излучателя был признан двигатель, обеспечивающий скорость перемещения каретки 12 см/мин.

Под действием оптического излучения импульсной ксеноновой лампы происходили процессы нагрева и сушки токопроводящей краски на образцах, перемещаемых под излучателем с помощью ЭМП.

Вторая экспериментальная установка для исследования процесса лазерного спекания токопроводящих красок (ТК) собрана на основе частотного твердотельного лазера, генерирующего на длинах волн 1,06 мкм и 0,532 мкм, а также непрерывно перестраиваемого посредством сапфир-титановой приставки в двух спектральных диапазонах 350 – 500 нм и 700 – 1000 нм.



1 – лазерный излучатель; 2 – держатель фильтров; 3 – светоделитель; 4 – рассеивающая линза; 5 – поворотное зеркало; 6 – фотодиод; 7 – осциллограф; 8 – устройство отвода продуктов сушки и абляции; 9 – подвижной столик системы позиционирования; 10 – блок питания; 11 – измеритель энергии; 12 – пульт управления; 13 – пирозлектрический приемник.

Рисунок 2 – Схема установки

Схема второй собранной установки представлена на рис. 2. Исследуемые образцы размещаются на подвижном столике системы позиционирования 9, снабженном реверсивным электродвигателем, частота вращения которого регулируется напряжением, подаваемым на его обмотки стабилизированным источником питания 10. Система позиционирования позволяет поступательно перемещать образец с постоянной скоростью в плоскости, перпендикулярной направлению распространения лазерного пучка, с возможностью регулировки скорости

перемещения. С помощью светоделительной пластинки 3 часть излучения генерации лазера отводится на пироэлектрический приемник измерителя энергии фирмы Ophir 11 для контроля плотности мощности излучения падающего на образец. Рассеивающая линза 4 опционально используется для изменения плотности мощности облучения. С помощью фотоприемника ФП 150А 6 и осциллографа Tektronix TDS 3052В 7 осуществляется контроль длительности вспышки при воздействии излучения на образец. Устройство 8 служит для удаления продуктов, образующихся при сушке, спекании или абляции с поверхности исследуемого образца.

Лазер 1 состоит из двух частей: собственно АИГ:Nd³⁺ лазера и встроенного в его блок излучателя перестраиваемого по длине волны преобразователя на кристаллах TiSa. Работа лазера основана на получении стимулированного излучения в активном элементе (АЭ) из кристалла АИГ:Nd³⁺ при накачке излучением импульсной ксеноновой лампы. Для получения "гигантского" импульса наносекундной длительности производится модуляция добротности лазерного резонатора электрооптическим затвором $\lambda/4$ из кристалла KDP. Преобразование излучения основной частоты (ОЧ) в излучение второй гармоники (ВГ) осуществляется в кристалле КТР. Оптическая накачка АЭ осуществляется импульсной лампой NL 7054. Работа преобразователя основана на получении стимулированного излучения в АЭ из кристалла TiSa при накачке излучением ВГ АИГ:Nd³⁺ лазера с модулированной добротностью. Перестройка длины волны генерации основного излучения TiSa лазера в области 350 – 500 нм во вторую гармонику осуществляется с помощью кристалла ВВО. Селекция излучения ОЧ и ВГ производится

спектроразделительными зеркалами. Основные характеристики лазерных пучков различных длин волн, формируемых установкой и использовавшихся для лазерной обработки образцов ТК, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики лазерного излучения различных длин волн

Длина волны, нм	Макс. энергия накачки, Дж	Макс. энергия импульса лазерного излучения, мДж	Характерные размеры светового пятна, мм
1064 без модул. добр.	19	200	6
1064 с модул. добр.	16	160-180	5,5
532	16	128,5	5,5
532	15	107,2	5,4
532	12	46,5	4,0
355	16	5,5	1,5
410	16	15,6	2×3 (эллипс)

Лазерная обработка образцов ТК производилась с частотой 5 Гц при скорости перемещения образца 30 мм/мин. После обработки при оптимальных режимах минимальное электрическое сопротивление дорожек ТК шириной $2,0 \pm 0,1$ мм, длиной $3,0 \pm 0,1$ мм и толщиной до 20 мкм составляло 0,2 Ом, что всего лишь в несколько раз превышает сопротивление аналогичных полос цельной технической меди.

УДК 669.(6-8):539.2

СТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ СПЛАВОВ (Sn₄In)_{100-x}Bi_x, ПОЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Шепелевич В.Г.¹, Гусакова С.В.¹, Гусакова О.В.²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

²Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова БГУ
Минск, Республика Беларусь

Эвтектический сплав In - 47 ат.% Sn, а также сплавы, близкие к нему по составу, используются в качестве легкоплавких припоев. Эвтектика состоит из β -фазы (In₃Sn) и γ -фазы (InSn₄). При этом влияние легирующих элементов на структуру и физические свойства γ -фазы изучены крайне недостаточно. В последнее время активизировались исследования по изучению диаграмм состояния систем Sn – In – X (X = Bi, Zn и др.) [1]. Однако высокоскоростное затвердевание из жидкости, относящееся к энерго- и ресурсосберегающим технологиям [2], может

приводить к образованию метастабильных фаз, не соответствующих равновесным. В связи с этим имеет важное научное и практическое значение исследование структуры и свойств быстрозатвердевших сплавов олово-индий, легированных третьим компонентом. Целью данного исследования является изучение влияния висмута на структуру и физические свойства сплава Sn – 11 ат. % In.

Сплавы (Sn – 11 ат. % In) – x ат. % Bi (в дальнейшем (Sn₄In)Bi_x, x = 0; 2, 4 и 8) получены сплавлением компонентов в кварцевой ампуле и