

Таблица 1 – Параметры переноса энергии кристаллов Тm:KLuW и Тm:KYW

Кристалл	$C_{DA}$ , $10^{-38}$ см <sup>6</sup> /с	$C_{DD} (^3H_4)$ , $10^{-38}$ см <sup>6</sup> /с	$C_{DD} (^3F_4)$ , $10^{-38}$ см <sup>6</sup> /с
Тm:KLuW	1.54	5.49	8.29
Тm:KYW	1.39	3.41	8.29
Тm:NBM	7.03	-	-

Значение параметра переноса определяющего кросс-релаксацию ( $C_{DA}$ ) для кристалла Тm:KLuW близко к результату полученному в работе [3].

Полученные параметры для кристаллов Тm:KYW и Тm:KLuW были использованы при

математическом моделировании лазеров на основе системы балансных уравнений, учитывающей процесс кросс-релаксации. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными (рис. 2.).

#### Литература

1. Influence of Energy Transfer by the Exchange Mechanism on Donor Luminescence / M. Inokuti, F. Hirayama // J. of Chem. Phys. – 1965 – Vol. 43. – P. 1978–1989.
2. A theory of Sensitized Luminescence in Solids/ D.L. Dexter // J. of Chem. Phys. – 1953. – Vol. 21. – P. 836–850.
3. Thulium doped monoclinic KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> single crystals: growth and spectroscopy / O. Silvestre / Appl. Phys. B – 2007. – Vol. 87. – P. 707–716.

УДК 621.315.592

### КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА МОДИФИКАЦИИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ПЛЕНОК ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА МЕТОДАМИ ЭПР, ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И РЭМ

Олешкевич А.Н.<sup>1</sup>, Оджаев В.Б.<sup>1</sup>, Мудрый А.В.<sup>2</sup>, Сернов С.П.<sup>3</sup>, Самбуу Мунхцэцэг<sup>4</sup>, Лапчук Т.М.<sup>1</sup>, Лапчук Н.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»  
Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>4</sup>National University of Mongolia  
Ulaanbaatar, Mongolia

Среди разнообразных способов модификации полимеров наиболее перспективным в практическом и фундаментальном направлении является обработка их поверхности. Исследование процессов трансформации структуры поверхностного и переходного слоев полимера в процессе модификации позволит разрабатывать технологии получения качественно новых материалов с улучшенными физико-химическими и эксплуатационными свойствами.

В качестве исследуемых образцов использовался полимер – полиэтилентерефталат (ПЭТФ), модифицированный методом ионной имплантации. Преимуществом данной технологии является контролируемое и точно дозируемое количество введённой примеси, использование высокотехнологичного, производительного и стандартного оборудования. Целью работы было комплексное исследование трансформации поверхности пленок ПЭТФ в процессе имплантации в них ионов различной природы с одинаковыми энергиями и дозой. Исследования проводились с использованием метода электронного парамагнитного резонанса, люминесценции и растровой электронной микроскопии.

Объектом исследования были пленки полиэтилентерефталата (ПЭТФ) (C<sub>16</sub>H<sub>8</sub>O<sub>4</sub>)<sub>n</sub> толщиной 50 мкм, исходные и имплантированные ионами

фосфора и сурьмы с энергией 60 кэВ в диапазоне доз 100–2000 мкКл/см<sup>2</sup>. Выбор параметров имплантации и вида ионов определялся, главным образом, использованием разработанных технологических операций для интегральной схемотехники. Спектры ЭПР имплантированных пленок регистрировались на спектрометре «RadioPan SE/X-2543» с резонатором Н<sub>102</sub> в X-диапазоне при комнатной температуре. Максимальная мощность сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения в резонаторе – 200 мВт. Частота СВЧ излучения в резонаторе контролировалась частотомером, поляризующее магнитное поле – датчиком ядерного магнитного резонанса. Для контроля добротности измерительного резонатора, настройки фазы модуляции магнитного поля и калибровки магнитной компоненты СВЧ излучения использовался кристалл рубина, закрепленный на стенке резонатора. Эксперименты по люминесценции проводились с использованием в качестве источника возбуждения лазера с длиной волны 325 нм. Структурные исследования полимерных пленок проводились на растровом электронном микроскопе S-4800 (Hitachi) с использованием энергодисперсного рентгеновского микроанализатора с XFlash детектором Quantex 200. Разрешение составляет 1 нм

Особенность имплантации ионов сурьмы в пленки полиэтилентерефталата по результатам

исследований методом ЭПР состоят в том, что сигналы поглощения наблюдались только при первых двух дозах – 100 и 200 мкКл. В тоже время имплантация ионов фосфора приводила к наблюдению спектров ЭПР при всех используемых дозах от 100 до 2000 мкКл. Значение фактора спектроскопического расщепления, как в случае ионов сурьмы, так и для ионов фосфора приблизительно равно 2,0026, что характерно для парамагнитных центров, обусловленных неспаренным электроном, локализованным на разорванной С–С-связи. Анализируя потери в резонаторе, вносимые облученными фосфором образцами, по амплитуде эталона рубина, закрепленного на стенке резонатора, было установлено, что максимальная проводимость в модифицированном слое пленок ПЭТФ наблюдалась при дозе облучения 200 мкКл. В то же время при увеличении дозы имплантации ионов сурьмы с 500 мкКл до 2000 мкКл сигналы поглощения в спектрах ЭПР не наблюдалось и можно было следить только за изменениями значений амплитуды эталона рубина. Впервые было обнаружено, что значение амплитуды рубина при этом оказалось выше, чем в не нагруженном резонаторе, в то время, когда облученный ионами сурьмы образец был в резонаторе. Это может свидетельствовать об образовании малых кластеров сурьмы и переходу имплантированного слоя из парамагнитного в диамагнитное состояние.

Эксперименты по люминесценции проводились с использованием в качестве источника возбуждения лазера с длиной волны 325 нм (энергия кванта 3,8 эВ). На коротковолновом крае спектра люминесценции образцов ПЭТФ, как видно из рисунка 1, наблюдаются узкие полосы, обусловленные люминесценцией основного материала, а не технологическими примесями, вводимыми ионной имплантацией, поскольку наблюдаются и в исходных пленках ПЭТФ.

Такие же полосы наблюдались и подробно описаны в работе [1]. Обнаруженная люминесценция согласно данной работы, интерпретируется как излучение, возникающее при рекомбинации разорванных С – С-связей полимерных цепей. Узкие (экситонные) полосы наблюдаются на коротковолновом крае спектра и в кристаллических полупроводниковых материалах. Обнаружено, что с увеличением дозы имплантации характер гашения люминесценции, как видно из рисунка 1 зависит от вида примеси.

Структура и элементный состав имплантированных ионами фосфора и сурьмы пленок ПЭТФ исследовался с помощью РЭМ. На рисунках. 2 и 3 показана поверхность пленок ПЭТФ, облученных ионами фосфора и сурьмы с дозами: а) 200 мкКл/см<sup>2</sup>; б) 2000 мкКл/см<sup>2</sup>.

При увеличении дозы имплантируемых ионов фосфора наблюдаются дефекты, представляющие

собой углубления (кратеры) практически полусферической формы с диаметром от 3 до 10 мкм, что можно интерпретировать как проявление эффекта блистеринга (вспучивание) и флехинга (отшелушивания) в модифицированном слое диэлектрической матрицы [2].

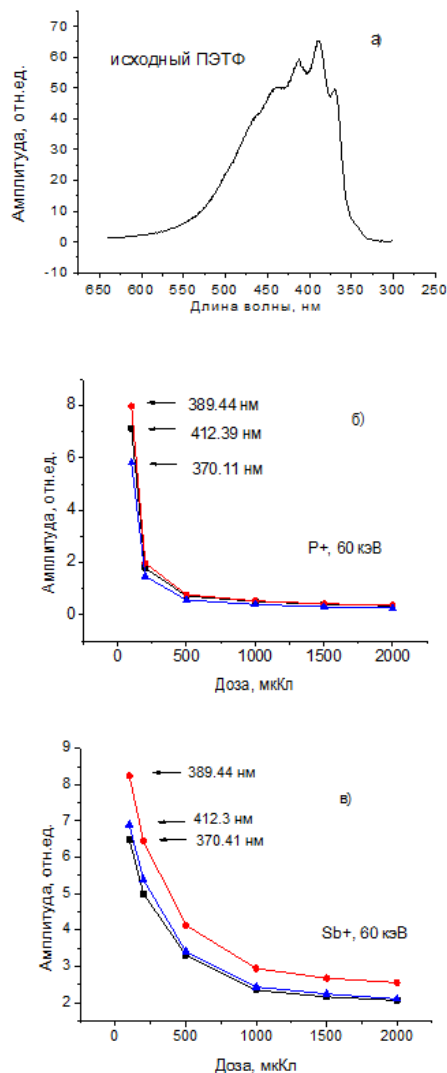


Рисунок 1 – Зависимость амплитуды спектра люминесценции с узкими линиями (а) в образцах ПЭТФ от дозы облучения ионами фосфора (б) и сурьмы (в)

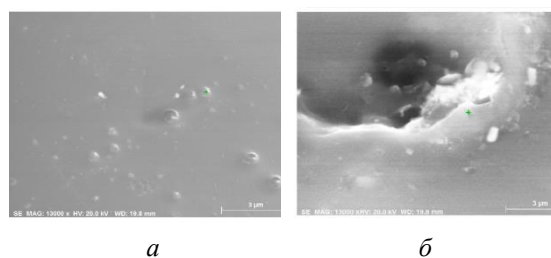
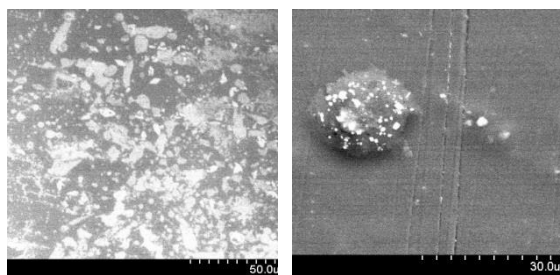


Рисунок 2 – Поверхность пленок ПЭТФ, облученных ионами фосфора с дозами: а – 200 мкКл; б – 2000 мкКл



а б

Рисунок 3 – Поверхность пленок ПЭТФ, облученных ионами сурьмы с дозами: а – 200 мкКл; б – 2000 мкКл

Проведенные исследования показывают, что с увеличением дозы имплантируемой примеси

сурьмы в пленки ПЭТФ есть вероятность образования в имплантируемом тонком слое основного вещества кластеров сурьмы [3].

### Литература

1. Копан М.Е., Аксянов И.Г. Узкополосная люминесценция полиэтилена и политетрафторэтилена в ближней ультрафиолетовой области спектра // Физика твердого тела, 2009, том 51, вып. 5, с. 1024–1027.
2. Primak W., Luthra J. Radiation blistering: Interferometric and microscopic observation of oxides, silicon, and metals. Journal of Applied physics 1966;37(6):2287–2294.
3. Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: сб. науч. тр. / под ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: ТГУ, 2014. – Вып. 6. – 484 с. (с. 95–100).

УДК 621.3.032.26(075.8)

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Недабой Т.Д.<sup>1</sup>, Шахлевич Г.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Республиканский научно-практический центр медицинских технологий  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Обработка крупногабаритных заготовок, выполнение нескольких операций на одном оборудовании, а также необходимость управления несколькими устройствами для позиционирования пятна лазерного луча, имеющими разные интерфейсы, требуют совмещения систем дефлекции лазерного луча с приводами подач. Как следствие, необходим особый подход к построению архитектуры системы управления [1]. Повышенные требования к технологичности и универсальности установок, быстрой переключению режимов обработки и контролю параметров лазерного излучения потребовали включения в состав установки многофункциональных систем числового программного управления и программно-управляемых модулей, что обеспечивает снижение затрат на разработку и обслуживание установок для лазерной обработки.

Структурная схема системы автоматизированной подготовки программ управления элементами технологического модуля лазерного комплекса. Детальный анализ архитектуры систем ЧПУ показал, что для повышения эффективности обработки необходимо доработать схему автоматизированной подготовки программ управления элементами технологического модуля лазерного комплекса. На рисунке 1 представлена структурная схема доработанной системы управления технологическими процессами. представлена структура доработанной системы управления технологическими процессами.

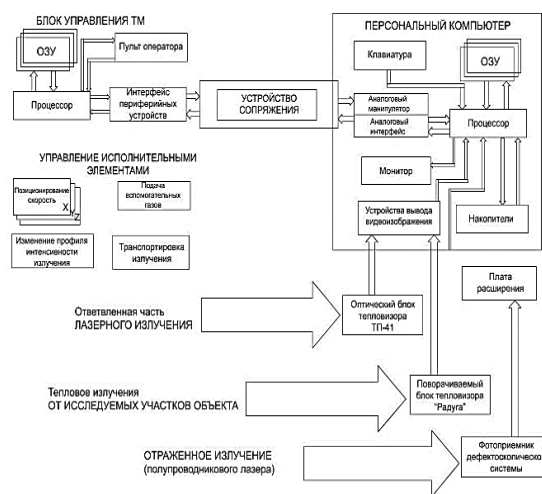


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления технологическими процессами

Основные функции предложенной системы управления близки к рассмотренной в [2]. Это:

- преобразование и передача данных, подготовленных в стандартных САПР, в программу управления исполнительными элементами: подачи вспомогательных газов, позиционирования, транспортировки излучения и изменения профиля его интенсивности;
- синтез программ управления и проведение соответствующих вычислений;
- отображение получаемого контура в системе координат плоскости обработки, определение