



## ОСОБЕННОСТИ НАНЕСЕНИЯ ЖИДКИХ ФОТОПОЛИМЕРОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПЛАНАРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Ю.С.Боброва, ассистент, [utd-utd@yandex.ru](mailto:utd-utd@yandex.ru);

М.Андроник, магистрант, [m\\_andronic@mail.ru](mailto:m_andronic@mail.ru);

Б.Б.Самадов, магистрант, [samadovbahrullo@gmail.com](mailto:samadovbahrullo@gmail.com); МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра "Электронные технологии в машиностроении"; Д.А.Даниленко, [danilenko-d@yandex.ru](mailto:danilenko-d@yandex.ru), АО "Концерн радиостроения "Вега",

Управление перспективных технологий, Москва

Фоточувствительные полимеры, применяемые в качестве конструкционных материалов при формировании планарных оптических волноводов, отличаются высокой вязкостью, а подложки, на которые они наносятся, – относительно большими габаритами, прямоугольной формой и наличием рельефа на поверхности. Толщина и равномерность фотополимерного слоя по площади заготовки влияют на все параметры процесса фотолитографии и на качество получаемых оптических волноводов. В статье рассмотрены способы нанесения полимерных слоев для формирования планарных оптических волноводов, интегрированных в оптоэлектронные модули. Даны рекомендации по планаризации полимерных слоев, наносимых на заготовки с рельефом высотой до нескольких десятков микрон.

### ВВЕДЕНИЕ

На функционирование аппаратуры бортового базирования, содержащей вычислители, СВЧ-платы и другие радиоэлектронные устройства, негативно влияют различные факторы, среди которых можно выделить наиболее существенные: искажения в металлических проводниках при передаче высокоскоростных информационных сигналов, внешнее электромагнитное излучение, механические разрушения элементов конструкции при вибрациях и перегрузках и др. [1]. Вместе с тем основной задачей при разработке рассматриваемых систем остается снижение массогабаритных характеристик и энергопотребления бортовой аппаратуры. Существующие конструкции определяются, в конечном счете, размерами электрорадиоэлементов, электронных модулей на их основе и требованиями к условиям их работы.

Перспективным направлением в области производства продукции радиоэлектроники, в том числе бортовых систем, является применение технологий создания монолитных оптоэлектронных модулей (ОЭМ), известных как технологии создания 3D-микросистем с интегрированными оптическими межсоединениями (ОМС).

Оптоэлектронный модуль – гибридная плата с оптическими и электрическими составляющими. Если на электрических модулях (ЭМ) носителями информации являются электроны, то в оптических модулях (ОМ) – это фотоны. Как показано на рис.1, между модулями функционирует преобразователь сигналов, который конвертирует один вид сигнала в другой.

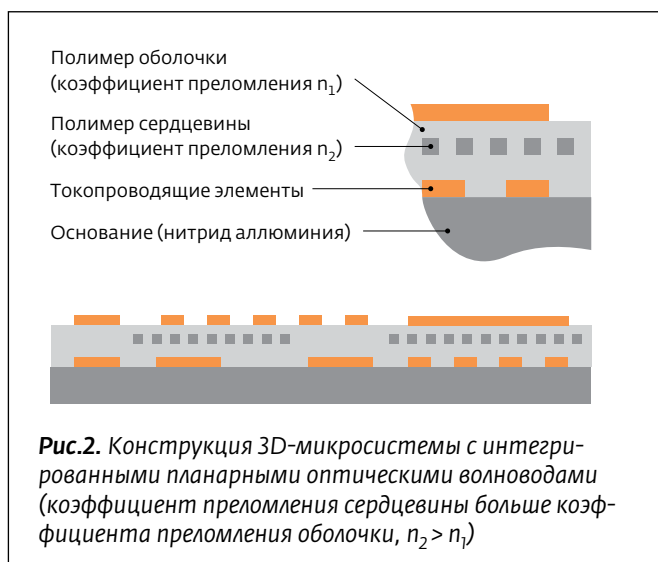
Таким образом, принципиальным недостатком использования оптоэлектронных модулей (ОЭМ) на данный момент является необходимость операций прямого и обратного преобразований в оптический диапазон, в ходе которых возникают существенные потери мощности сигнала (30 дБ) [2]. Тем не менее, влияние таких потерь в значительной степени компенсируется за счет малых собственных потерь в волноводе. К тому же, ОМС позволяет исключить взаимное негативное влияние электромагнитных наводок от СВЧ-кристаллов, установленных в одном и том же радиоэлектронном модуле, так как их соединение гальванически развязано.

Сложность изготовления таких изделий также возникает из природы обрабатываемых сигналов, что не позволяет напрямую соединить оптические и электронные модули (ОМ и ЭМ). Основные методы сборки ОЭМ представлены в табл.1.

Наибольший интерес представляет послойная сборка, поскольку этот вариант позволяет добиться многослойного ОЭМ. Как способ достижения многослойной конструкции электрической части можно использовать традиционный метод изготовления многослойных ГИС, выполняемых по тонкопленочной технологии, а для достижения многослойности оптической части – фотолитографические процессы.

Элементной базой этих технологий являются кристаллы самого различного типа и назначения: от кристалла процессора и кристалла памяти до кристалла полупроводникового лазера.





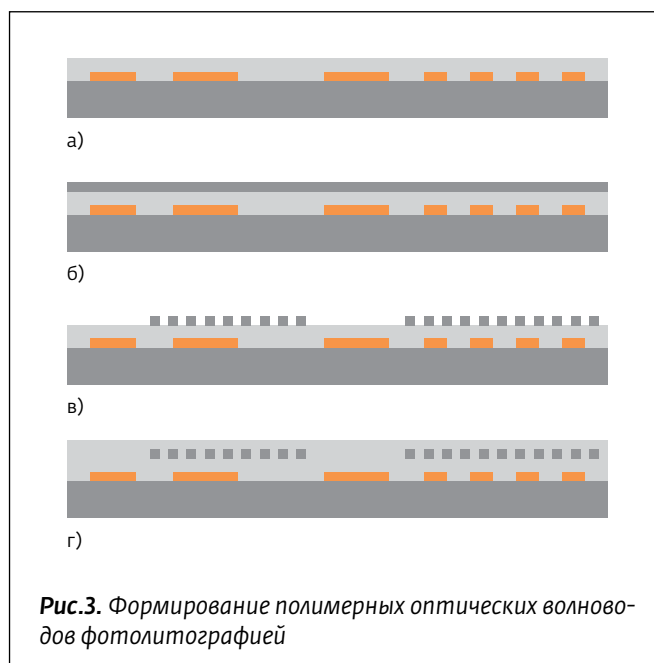
более технологичным методом формирования ОВ для 3D-микросистем и ОЭМ на основе многослойных печатных плат, является фотолитография (контактная для печатных плат, на микрозоре для 3D-микросистем, прямое экспонирование для обоих типов изделий).

Производством оптических фоточувствительных полимеров занимаются американские компании Optical Interlinks, Dow Chemical, Dow Corning, MicroChem Corp., английская компания Exxelis, южнокорейская — Chemoptics и другие. Основные фоточувствительные материалы для ОВ представлены в табл.3.

Отличительная особенность работы с этими фотополимерами связана с их высокой вязкостью (до тысяч сантипуаз) и относительно большой толщиной формируемых из них слоев в случае многомодовых ОВ (до нескольких десятков микрон).

**Таблица 2.** Связь толщины фотополимеров и фоторезистов ( $h$ ) с временем ( $t$ ) технологической обработки

Номер этапа	Технологический процесс	Связь толщины с временем технологического процесса
1	Нанесение центрифугированием	$h \sim t^{2/3}$
2	Сушка	$h \sim t^2$
3	Экспонирование	$(h) \sim \exp(t)$
4	Проявление	$h \sim t$
5	Скорость травления	$h \sim t$
6	Скорость удаления фотополимера	$h \sim t^2$



## ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ ИЗ МАТЕРИАЛОВ EPOCLAD И EPOCORE

В основе процесса получения ОВ из фоточувствительных материалов лежит послойное нанесение полимеров на заготовку и соответствующая их обработка. В качестве примера на рис.3. представлена схема процесса получения ОВ из материалов типа EpoClad и EpoCore, характеристики которых приведены в табл.4.

Как видно из рис.3, процессы нанесения фотополимеров лежат в основе большинства этапов формирования ОВ. Стоит отметить тот факт, что технологические параметры процессов нанесения и обработки слоев материала оболочки и слоев и структур из материала сердцевины несколько различны, что нужно учитывать на этапе выбора комплекта оборудования для изготовления изделий с полимерными ОВ.

Контроль толщины после нанесения может проводиться бесконтактными методами, такими как вычисления через объем и плотность наносимого полимера, рефлектометрия, эллипсометрия, фокусировка оптической системы. Контроль контактными методами невозможен, так как до завершения этапа сушки покрытие остается липким.

## ТИПОРАЗМЕРЫ ПОЛИМЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

Для формирования одномодовых ОВ, размеры которых могут принимать значения от  $2 \times 2$  мкм до  $10 \times 10$  мкм, применяются EpoClad и EpoCore

**Таблица 3.** Фотополимеры для оптических волноводов

Изготовитель	Полимер сердцевины (Core)	Полимер оболочки (Clad)	Полимерная основа
Dow Chemical	LightLink XP-6701A Core	LightLink XP-5202A Clad	Силескквиоксан
DOW Corning	OE-4140 UV	OE-4141	Силоксан
Micro resist technology GmbH	EpoCore	EpoClad	Эпоксидная основа
Micro resist technology GmbH	OrmoCore	OrmoClad	Гибридный полимер
Exxelis	Truemode core	Truemode clad	Акрилат

серий 2, 5 и 10. Допуск на неравномерность толщины слоя фотополимера после сушки не должен превышать  $\pm 5\%$ , что для заготовок без рельефа или с незначительным по высоте рельефом на поверхности (например, в виде тонкопленочных элементов) приравнивается к допуску на неравномерность толщины слоя фотополимера при нанесении.

Многомодовые ОВ формируют из EpoClad и EpoCore серий 5, 10, 20 и материалов EpoClad и EpoCore без указания серии. Размеры таких волноводов могут составлять от  $10 \times 10$  мкм до  $75 \times 75$  мкм. Оптические межсоединения на основе таких волноводов чаще всего располагаются поверх электрической части ОЭМ, т.е. по поверхности с относительно высоким рельефом (до 18 мкм высотой и зазором между элементами около 100–250 мкм в случае ОЭМ на многослойных печатных платах). Также необходимо заполнить материалом оболочки все полости между сердцевинами волноводов (размер полостей в предельном значении 75 мкм высотой и 50 мкм шириной зависит от геометрических параметров приёмо-передающих элементов). Допуск на неравномерность толщины слоя фотополимера после сушки находится в интервале от 5% до 10% в зависимости от размера ОВ и того, будут ли поверх этого

слоя формироваться структуры при помощи оптической литографии.

### ТРЕБОВАНИЯ К ФОРМИРУЕМЫМ ПОЛИМЕРНЫМ СЛОЯМ

Среди факторов, влияющих на поглощение и рассеяние сигнала, следует выделить нарушение геометрических параметров сечения ОВ, отсутствие воспроизводимости геометрии формы сечения ОВ по площади заготовки, наличие оптических неоднородностей вдоль границы контактирования полимера оболочки и сердцевины, а также наличие оптических неоднородностей внутри сердцевины.

Полимерный слой оболочки ОВ должен полностью покрывать и планаризировать рельефную топологию поверхности, на которую он наносится. При изготовлении ОЭМ слои диэлектриков и металлов, нанесенные в различной последовательности при получении электрической части, а также структуры сердцевины ОВ при формировании верхнего слоя оболочки создают неровную поверхность, не позволяющую на этапе последующего экспонирования получать требуемое раз-  
решение. Способность полимерного слоя оболочки

**Таблица 4.** Основные характеристики фоточувствительных оптических материалов EpoClad и EpoCore

Назначение	Оболочка ОВ		Серцевина ОВ	
Материал	EpoClad	EpoClad серии 10	EpoCore	EpoCore серии 10
Основа	Эпоксидная смола (Duromer Epoxy) 65–75 %		Эпоксидная смола (Duromer Epoxy) 55–65 %	
Растворитель	Гамма-бутиролактон 15–25 %		Гамма-бутиролактон 25–35 %	
Инициатор реакции фотополимеризации	Триарил сульфониновые соли < 5%			
Коэффициент преломления	1,544	1,525	1,546	1,531
Вязкость, сП	11 700–12 500	800–850	9 800–11 000	1130–1220
Толщина, мкм	30–120	5–25	20–80	6–25



ОВ повторять рельеф и его планаризующая способность зависят от высоты рельефа, его радиальной ориентации (параллельно или перпендикулярно оси симметрии подложки), от расстояния между элементами рельефа, вязкоупругих свойств высушенного покрытия, а также метода его нанесения.

Исходя из этого, можно выдвинуть ряд требований к процессу нанесения полимерных слоёв для последующего формирования ОВ:

- неравномерность толщины покрытия по всей площади заготовки должна быть в пределах допуска (часто  $\pm 5\%$ );
- единовременное нанесение оптического полимера сердцевины;
- обеспечение полной смачиваемости структур сердцевины полимером оболочки;
- минимальная вероятность захвата воздуха при нанесении полимера.

Помимо этих требований к методам нанесения жидких фотополимеров высокой вязкости и оборудованию для их реализации предъявляется дополнительный набор требований, учитывающий:

дованию для их реализации предъявляется дополнительный набор требований, учитывающий:

- размер и форму подложки;
- рельеф на поверхности подложки;
- толщину наносимого слоя;
- вязкость полимера и объемное содержание твердой фракции;
- расход фотополимера;
- размер и форму технологического поля;
- степень загрязнения обратной стороны подложки после нанесения покрытия;
- наличие термообработки и других способов для интенсификации процесса самопланаризации.

### МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ЖИДКИХ ПОЛИМЕРОВ

Подавляющее большинство методов нанесения жидких полимеров (табл.5), широко применяется для нанесения лакокрасочных покрытий. Однако описанные выше требования к наносимым покрытиям накладывают серьезные ограничения

Таблица 5. Методы нанесения жидких фотополимеров [5-7]

Методы			Динамическая вязкость, сП	Толщина, мкм	Неравно- мерность, %	Нанесение полимера		
						оболочки	сердцевины	
							одномо- дового ОВ	многомо- дового ОВ
Методы дозирования								
1	Щелевой		15–20 000	10–250	2	Да	Нет	Да
2	Экструзионный		50 000–300 000	15–500	5	Да	Нет	Да
3	Поливом		5–5 000	5–500	2	Нет	Нет	Нет
4	Скользящий		1–500	25–250	2	Нет	Нет	Нет
5	Распыление	аэрозольное	10–300	0,5–10	10	Да	Да	Нет
		ультразвуковое	25–350	0,5–10	5	Да	Да	Нет
Методы, основанные на удалении с поверхности заготовки избыточного количества жидкого полимера								
6	Валковое нанесение	прямое	20–2 000	10–200	10	Нет	Нет	Нет
		обратное	20–50 000	10–500	2	Нет	Нет	Нет
7	Ракелем/ ножом	жестким	500–40 000	10–750	10	Да	Нет	Да
		гибким	50–20 000	15–150	10	Да	Нет	Да
		воздушным ножом	5–500	0,1–200	5	Нет	Нет	Нет
8	Окунание		40–1 500	10–150	10	Нет	Нет	Нет
9	Центрифугирование		5–70 000	0,001–500	1-5	Да	Да	Да

Примечание: Да – метод обеспечивает выполнение условий, Нет – метод не обеспечивает выполнение условий

на выбор метода и реализацию оборудования для его осуществления.

Ориентируясь на то, что помимо технических требований к формируемым покрытиям, следует учитывать серийность производства (в РФ преобладает многономенклатурное единичное и мелкосерийное производство изделий), для производства 3D-микросистем с ОМС или оптоэлектронных модулей на печатных платах целесообразно рассматривать такие методы нанесения, как щелевой метод, метод нанесения ракелем, распылением и центрифугированием (табл. 6).

### ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕ

Слои фотополимерных материалов вязкостью выше 500 сП с требованиями по неравномерности толщины не хуже 5% рекомендуется наносить на осесимметричные заготовки размером до 200×200 мм методом центрифугирования (дополнительные ограничения по применению метода представлены в табл. 6).

Для нанесения толстых слоев фотополимеров методом центрифугирования можно использовать следующие технологические приёмы:

- нанесение слоя фотополимера толщиной больше требуемой при малых скоростях и ускорениях с последующим повышением скорости и ускорения для сбрасывания излишков фотополимера и достижения требуемой толщины;
- смачивание поверхности нанесенного фотополимера растворителем во время выхода на требуемую рабочую скорость;

- нанесение тонкого слоя фотополимера при больших скоростях с последующим нанесением второго слоя при рекомендуемой скорости;
- нанесение фотополимера при скоростях не более 1000 об/мин и малых ускорениях (до 100 об/мин/с) с целью формирования неравномерности в форме кратера, после чего в углубление дозируется фотополимер до полного его заполнения и следует распределение при 1000 об/мин и выравнивание при рабочей скорости более 3000 об/мин.

Данные технологические приёмы важны ещё и по той причине, что полимеры сердцевин после полимеризации достаточно плохо смачиваются полимером оболочки и наоборот, что было выявлено при работе с материалами EpoClad и EpoCore (серий 5, 10, 20). Таким образом, необходимо обеспечить не только требования по неравномерности толщины наносимого покрытия, но и полное всестороннее покрытие микроструктур сердцевин материалом оболочки.

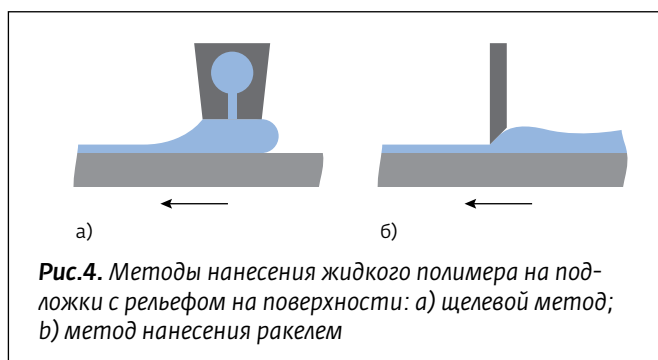
Помимо вышеперечисленных способов, приемлемой смачиваемости полимеризованного слоя жидким фотополимером можно достичь, применяя ионно-плазменную и плазмохимическую обработку полимеризованных слоев/структур перед нанесением методом центрифугирования следующего слоя. Применение усилителей адгезии для этих целей не рекомендуется, поскольку оставшаяся на поверхности сердцевин сплошная пленка толщиной до нескольких десятков нанометров не обладает нужными оптическими характеристиками.

Таблица 6. Методы нанесения слоев оптических полимеров

Метод	Условия применения метода								
	Толщина наносимого слоя, мкм		Вязкость наносимого жидкого полимера, сП			Рельеф на поверхности подложки. Толщина/минимальный зазор, мкм		Характерный размер заготовки, мм	
	2 - 5	5 - 50	≤350	≤1000	≤10 000	2/25	18/100	≤□200 ≤Ø300	>200
Центрифугирование	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Нет	Да	Нет
Распыление аэрозольное, ультразвуковое	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Да	Да	Да	Да
Щелевой	Нет	Да	Нет	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Нанесение ракелем	Нет	Да	Нет	Да	Да	Да	Да	Да	Да

Примечание: Да – метод обеспечивает выполнение условий, Нет – метод не обеспечивает выполнение условий





## МЕТОД РАСПЫЛЕНИЯ

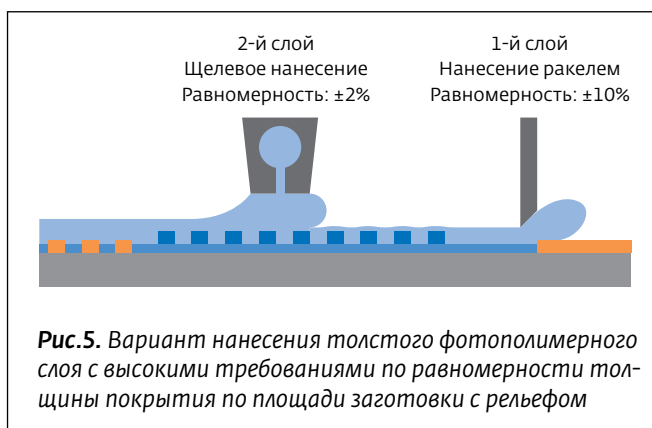
Жидкие фотополимеры вязкостью до 350 сП на прямоугольные заготовки с рельефом по поверхности целесообразно наносить распылением.

Слои фотополимерных материалов оболочки одномодовых ОВ 3D-микросистем рекомендуется наносить распылением с целью всестороннего покрытия микроструктур из материала сердцевины. Этот метод [8] также следует иметь в виду при организации экспериментального производства, когда в развитие темы формирования ОМС может возникнуть необходимость изготовления полимерных береговых решёток, период которых составляет доли микрометров.

## ЩЕЛЕВОЙ МЕТОД НАНЕСЕНИЯ И МЕТОД НАНЕСЕНИЯ РАКЕЛЕМ

Для нанесения жидких полимеров вязкостью от 100 до 15000 сП (основной интервал вязкости для фотополимеров, применяемых при формировании ОВ) с требованием по неравномерности покрытия не более 5% могут применяться щелевой метод и метод нанесения ракелем (табл.5, рис.4). Оба этих метода относятся к методам дозирования, при которых средняя толщина формируемого слоя определяется объемом подаваемого полимера, геометрическими параметрами инструмента, скоростью его движения, а также зазором между рабочей гранью инструмента и поверхностью заготовки.

Для экспериментального производства оборудования, реализующее щелевой метод, наиболее предпочтительно для нанесения слоев оптических полимеров. Гибкость технологического процесса, а также относительно высокая производительность при достаточно высоком качестве наносимого покрытия на крупноформатные заготовки прямоугольной формы позволяют делать выбор в пользу такого оборудования, что обосновано не только с технической, но и экономической точки зрения.



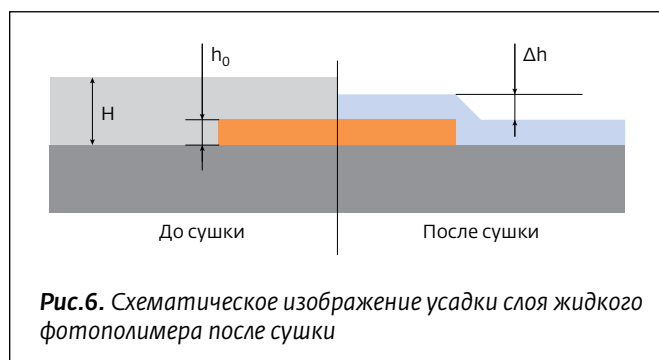
С примерами оборудования щелевого нанесения (Slot coating) можно ознакомиться на сайтах таких производителей, как TSE Troller AG (Швейцария), nTact (США), GMA Machinery Enterprise Co., Ltd. (Тайвань) и др.

Для создания фотополимерного покрытия на заготовках с высоким рельефом на поверхности можно использовать комбинированный метод нанесения, заключающийся в последовательном применении жёсткого ракеля (ножа) и инструмента для щелевого нанесения (рис.5). Однако нужно учитывать тот факт, что во время сушки происходит неизбежная усадка фотополимера, так как растворитель составляет от 25 до 40% объема наносимого покрытия. Комбинация двух методов позволит заполнить пустоты между структурами на поверхности заготовки, но не гарантирует высокую плоскостность верхней поверхности покрытия. Добиться ее можно сочетанием термообработки с последующей пластической деформацией нанесенного слоя фотополимера.

Также для борьбы с данным явлением предлагается наносить до окончательной сушки фотополимера еще один более тонкий слой, который будет сглаживать перепады высоты  $\Delta h$  (рис.6). Этот прием можно применять в случае нанесения слоя материала оболочки. В случае нанесения слоя материала сердцевины, для которой важна оптическая однородность, последствия применения данного приема не исследованы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аэрозольное и ультразвуковое распыление фотополимеров с вязкостью в несколько сотен сантистоксов предпочтительны для нанесения покрытий толщиной до 5 мкм на заготовки с рельефом по поверхности. При этом толщина покрытия набирается за счет нескольких проходов инструмента над заготовкой, что существенно сказывается на длитель-



ности процесса нанесения и шероховатости получаемого покрытия.

Метод центрифугирования остается лидером для получения толстых слоёв фотополимеров на осесимметричных заготовках относительно небольшого размера без рельефа или с незначительным, плотно расположенным рельефом на поверхности.

Щелевой метод и метод нанесения ракелем позволяют обеспечить заполнение полостей между элементами высокого рельефа на поверхностях большеформатных прямоугольных заготовок, а также получать покрытия толщиной до нескольких сотен микрон из фотополимеров высокой вязкости.

Оборудование, реализующие эти методы нанесения толстых слоев фотополимеров (от десятков до сотен микрон), следует рассматривать в первую очередь при организации производства 3D-микросистем с интегрированными оптическими межсоединениями или производства оптоэлектронных модулей на основе многослойных печатных плат.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Даниленко Д.А.** Радиоэлектронные модули монолитного исполнения с решениями микрофотоники для перспективных образцов бортовых инфор-

мационно-управляющих систем. – Международная конференция "Микроэлектроника-2015", Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение: Сб. докл. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016, с. 654–659.

**Danilenko D.A.** Radioelektronnye moduli monolitnogo ispolneniya s reshenijami mikrofoniki dlja perspektivnyh obrazcov bortovyh informacionno-upravljajushih sistem. – Mezhdunarodnaja konferencija "Mikroelektronika-2015", Integral'nye shemy i mikroelektronnye moduli: projektirovanie, proizvodstvo i primenenie: Sb. dokl. – М.: TEHNOSFERA, 2016, s. 654–659.

2. **Урик Винсент Дж.-мл., МакКинни Джейсон Д., Вилльямс Кейт Дж.**

Основы микрофотоники. – М.: Техносфера, 2016.

**Urik Vinsent Dzh.-ml., MakKinni Dzhejson D., Vill'jams Kejt Dzh.** Osnovy mikrofoniki. – М.: Tehnosfera, 2016.

3. **Моро У.** Микролитрография: В 2-х частях. Ч. 1/ Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 605 с.

**Moro U.** Mikrolitografija: V 2-h chastjah. Ch. 1/ Per. s angl. – М.: Mir, 1990. – 605 s.

4. **Кузовков А.В., Кузнецова Д.М.** Планарные оптические волноводы в электронике. Оценка разрешающей способности фотополимера EpoCore. – ВНТК "Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии": Матер. конф., 2015, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана /Под. ред. Ю.А. Гладкова. – М.: ООО "КванторФорм", 2015, с. 416–423.

**Kuzovkov A.V., Kuzishheva D.M.** Planarnye opticheskie volnovody v elektronike. Ocenka razreshajushhej sposobnosti fotopolimera EpoCore. – VNTK "Studencheskaja nauchnaja vesna: Mashinostroitel'nye tehnologii": mater. konf., 2015, Moskva, MGTU im. N. Je. Bauman /Pod. red. Ju.A. Gladkov. – М.: ООО "KvantorForm", 2015, S.416–423.

5. **Wolf R.** A Technology Decision – Adhesive Lamination or Extrusion Coating/ Lamination? Enercon Industries Corporation, 2009. 26 p. URL: <http://www.tappi.org/content/events/10PLACE/papers/wolf1.pdf> (дата обращения: 11.12.2016 г.).
6. **Sengupta A.** Presentation: Fluid Mechanics of Coating Flows, Centre of Advanced Fluid Mechanics. Germany, 2008. URL: <http://www.leb.eei.uni-erlangen.de/winterakademie/2008/report/content/course01/pdf/0115.pdf> (дата обращения: 12.12.2016)

7. **Gutoff E.B., Cohen E.D., Kheboian G.I.** Coating and drying defects: troubleshooting operating problems. – Wiley-Interscience, 2006.

8. **Сидоров А.** Нанесение фоторезиста при формировании межсоединений на кремнии. – Промышленные нанотехнологии, 2011, № 5, с. 28–30.

**Sidorov A.** Nanesenie fotorezista pri formirovanii mezhsoedinenij na kremnii. – Promyshlennye nanotehnologii, 2011, № 5, s.28–30.