

УДК 621.383.4

ИНТЕРВАЛЬНОЕ ЭКСПОНИРОВАНИЕ КАК СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО РАЗМЕРА

Михаил Михайлович Андроник

*Магистр 1 года,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана.*

*Научный руководитель: Ю.С. Боброва,
ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении».*

Аннотация: Операция экспонирования является самой дорогой в процессе фотолитографии и имеет наименьшее технологическое окно. Энергия актиничного излучения используется для изменения физико-химических свойств фоторезиста и параллельно с этим приводит к произвольному нагреву зоны экспонирования, что в ряде случаев инициирует полимеризацию фоторезиста. В данной статье теоретически обосновано и экспериментально подтверждено влияние локального нагрева на разрешающую способность системы. Предлагается способ снижения влияния локального нагрева на разрешение посредством интервального экспонирования.

Контактная фотолитография связана с простотой оборудования и легкостью технологических операций, но ограничена по критическому размеру получаемых элементов топологии. Получить топологию с размерами менее 10 мкм затруднено.

Для производства печатных плат используются пленочные фоторезисты. Толщина таких фоторезистов варьируется от нескольких десятков до сотен микрон в зависимости от их предназначения и класса точности изготавливаемой платы. Существует такая эмпирическая зависимость, согласно которой критический размер составляет три толщины фоторезиста [1]. Но при учёте факторов, влияющих на процесс фотолитографии, можно добиться улучшения его разрешающей способности.

Главным лимитирующим фактором при получении размеров свыше 50 мкм, является степень коллимации актиничного излучения. Дифракция при таких топологических размерах оказывает несущественное влияние [2]. Рассмотрим влияние такого фактора, как тепло и теплопередача.

Рассмотрение данного фактора имеет следующие предпосылки. Ртутные лампы, которые используются для экспонирования, имеют спектр излучения (рисунок 1) более широкий, чем максимум поглощения фотоинициатором, непосредственно участвующим в полимеризации фоторезиста. Это означает, что одновременно с передачей в толще фоторезиста требуемого спектра излучения передаются и спектры, которые не участвуют в реакциях. Данная энергия переходит в нагрев.

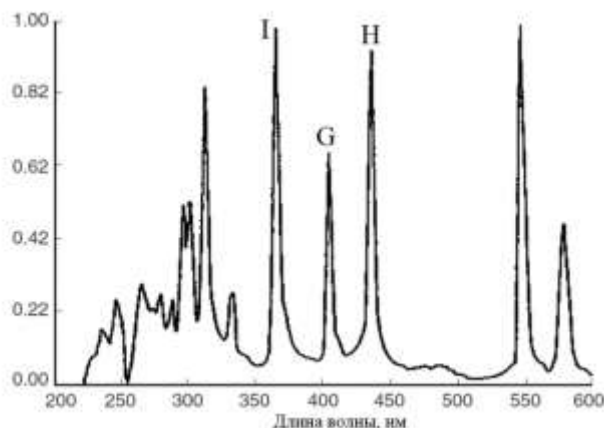


Рис.1. Спектр излучения ртутной лампы высокого давления [3]

Другая предпосылка исходит из физико-химических свойств пленочных фоторезистов. Фотоиницированная полимеризация никогда не использовалась в полупроводниковой литографии, требующей высокого разрешения, из-за кислородного эффекта (образования при взаимодействии с кислородом свободных радикалов, приводящих к полимеризации) и клейкости пленки. Но она нашла уникальное применение в технологии производства печатных плат [1]. На рисунке 2 изображён процесс полимеризации: активничное излучение поглощается кетоном Михлера, который, разлагаясь, создает продукты для формирования красителя и энергии для полимеризации.

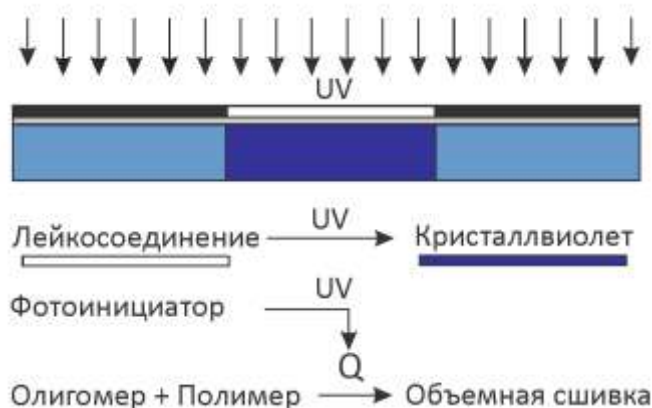


Рис. 2. Схема полимеризации пленочного фоторезиста

Для лучшего отличия глазом экспонированного и неэкспонированного фоторезиста и меди используются специальные красители синего и зеленого цвета. К красителям синего цвета относятся кристаллфиолет, который при облучении ультрафиолетом переходит из лейкосоединения (бесцветное) в кристаллфиолет (фиолетовое). Фотоинициаторы поглощают энергию фотонов и преобразуются в свободные радикалы, участвующие в реакции полимеризации. Примером такого инициатора являются кетон Михлера, который имеет максимум поглощения при 365 нм. Данная реакция является экзотермической, а вырабатываемая энергия позволяет осуществлять полимеризацию. Кетон Михлера может быть использован для получения кристаллфиолета при реакции с диметиланилином и оксихлоридом фосфора [4].

Исследуем влияние локального нагрева фоторезиста во время экспонирования (рисунок 3). При экспонировании фоторезист дополнительно нагревается от активничного излучения — Q_1 (Дж). Это было экспериментально подтверждено (температура поверхности повышается на 10°C при экспонировании на установке AZ210 с параметрами для получения проводников 250/250 мкм). И так как полимеризация происходит благодаря экзотермическому характеру

реакции разложения кетона Михлера – Q_2 (Дж), фоторезист должен нагреваться дополнительно. Из-за теплопроводности зонам вблизи края экспонирования может быть передана достаточная энергия для полимеризации

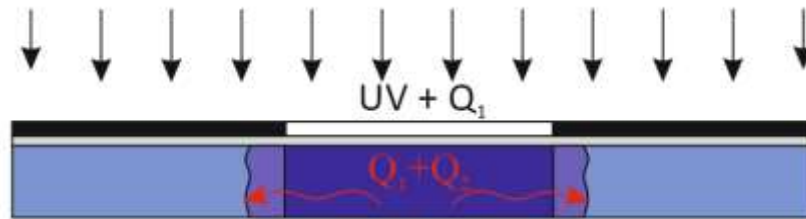


Рис. 3. Потери разращания за счет теплопроводности

Кроме этого наблюдается явление, заключающееся в том, что при длительном нагреве фоторезиста он полимеризуется со всеми отличительными признаками. Такое явление наблюдается в зоне контактирования пленочного фоторезиста с валами ламинатора, или может быть воссоздано простым внешним нагревом.

Фоторезист должен одновременно выполнить две функции: выдерживать топологические размеры и защищать поверхность от последующих технологических воздействий. Так как тепловая энергия приводит к полимеризации, выявляем следующее противоречие (рисунок 4).



Рис. 4. Схема предметного противоречия изменения количества тепловой энергии в зоне экспонирования

При увеличении тепловой энергии интенсифицируется процесс полимеризации засвеченных участков фоторезиста, но зона вблизи области экспонирования за счёт теплопроводности также может претерпевать полимеризацию, нежелательную в данном случае. Первый эксперимент был направлен на выявление изменений в процессе полимеризации при снижении локального нагрева в местах засвечивания фоторезиста.

Данное противоречие будем решать дроблением дозы экспонирования по времени. Такой способ экспонирования встречается в работе [5] при экспонировании толстого слоя фотополимера SU-8. Делается предположение, что энергия при экспонировании избыточно нагревает фоторезист, следовательно, при разбиении дозы на интервалы уменьшается нагрев, что можно выявить после проведения операции проявления. При уменьшении тепловой энергии уменьшается степень полимеризации, но и уменьшается и зона термического влияния, что должно привести к улучшению разрешающей способности, именно тем уменьшая критический размер.

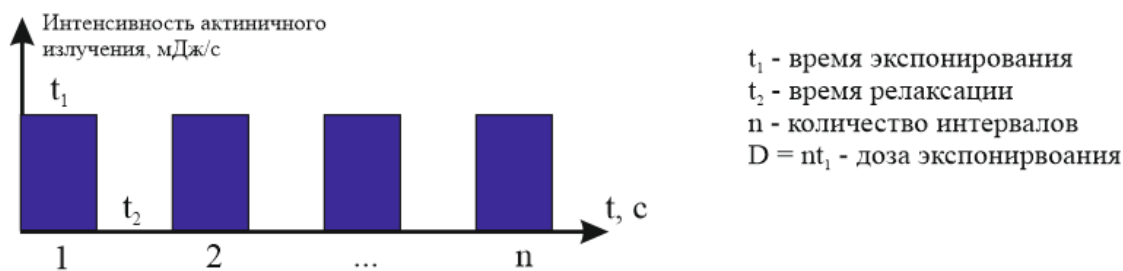


Рис. 5. Интервальное экспонирование

Первый эксперимент был направлен на выявление изменений в процессе полимеризации при одинаковых дозах экспонирования. Из предположения, что энергия при экспонировании избыточно нагревает фоторезист, следует, что при разбиении дозы на интервалы уменьшается нагрев, что можно выявить после проявления.

Определение недостаточной или избыточной дозы по цвету — очень сложная задача. На рисунке 6 показаны цвета, которые получаются при экспонировании пленочного фоторезиста Ordyl Alpha 340 от 10 до 40 с. Но делать выводы относительно пригодности использования данной дозы в качестве рабочей не возможно.

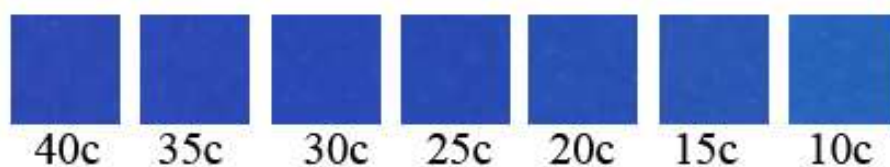
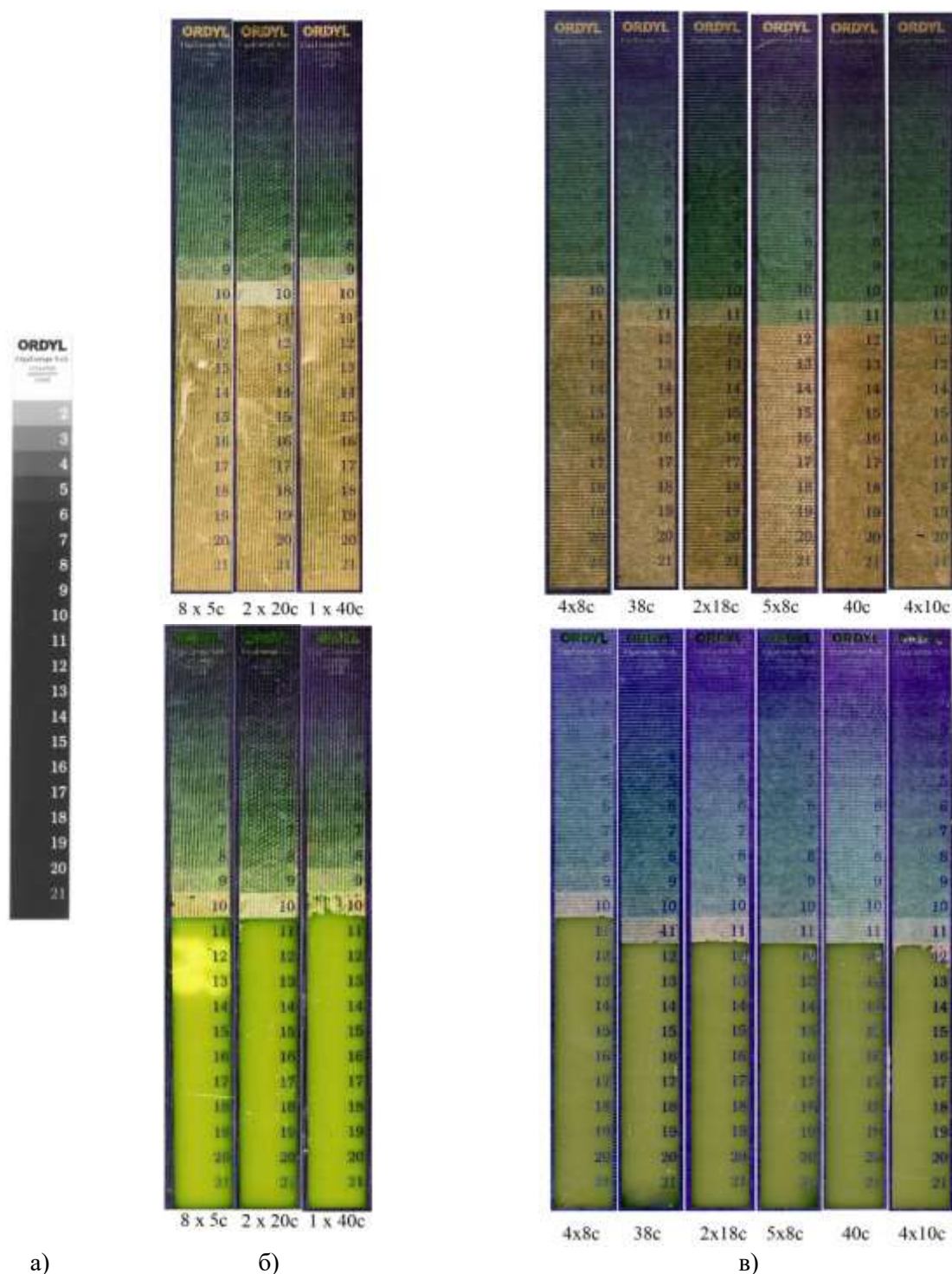


Рис. 6. Цвет фоторезиста при разных дозах экспонирования

Это позволяет сделать использование шаблона Штоуффера. Он состоит из 21 области разной степени прозрачности. При калибровке процесса для фоторезистов Ordyl Alpha рекомендуется получить №6-№9 при проявлении. Для снижения или повышения на один номер время экспонирования уменьшается или повышается соответственно на 1,41. В данной работе будем использовать шаблон Штоуффера для сравнения степени полимеризации фоторезиста при интервальном экспонировании.

Для проверки влияния нагрева от актиничного излучения на степень полимеризации было использовано экспонирование через шаблон Штоуффера. В качестве фоторезиста был использован Ordyl Alpha 340 толщиной 40 мкм. Он является типовым представителем пленочных фоторезистов в производстве печатных плат. Получение более насыщенного цвета свидетельствует о повышении концентрации кристаллфиолета, который в свою очередь получен при разложении кетона Михлера, разложение которого и является инициатором процесса полимеризации. Таким образом, насыщенность фиолетового цвета свидетельствует о более полной степени полимеризации.

Экспонирование производилось на установке контактного экспонирования Mega Electronics AZ 210. Проявление проводилось в водном растворе Na_2CO_3 (0,8-1,2%), а травление меди осуществилось в растворе хлорного железа (III).



а) б) в)
Рис. 7 а) Шаблон Штоуффера, б) Эксперимент 1, в) Эксперимент 2

Изучая результаты, которые представлены на рисунке 7, отмечаем, что с увеличением количества интервалов экспонирования, фиолетовый оттенок фоторезиста становится менее выраженным, что свидетельствует о понижении уровня кристаллфиолета. На рисунке 7б и 7в, наглядно изображены результаты после травления для первого и второго эксперимента.

№10 +			
№10 .			
№10 -			
№9 +			
№9 .			
№9 -			
Доза экспонирования	5с x8	20с x2	40с x1

Рис. 8. Номер по шкале Штоуффера, при котором фоторезист частично или полностью защищает поверхность меди при травлении. Первый эксперимент

Первый эксперимент свидетельствует о схожем процессе сшивки (полимеризации) фоторезиста, потому по диаграмме видно, что образцы отличаются менее чем на 1/3 номера шкалы Штоуффера. Таким образом, можно сделать вывод о том, что интервальное экспонирование уменьшает термическое влияние актиничного излучения с сохранением полимеризирующих свойств (более фиолетовый цвет при однократном экспонировании; менее фиолетовый при интервальном экспонировании).

№12 -						
№11 +						
№11 .						
№11 -						
№10 +						
№10 .						
№10 -						
Суммарное время экспонирования	4x8с	1x38с	2x18с	5x8с	40с	4x10с
	32с	38с	36с	40с	40с	40с

Рис. 9. Номер по шкале Штоуффера, при котором фоторезист частично или полностью защищает поверхность меди при травлении. Второй эксперимент

В ходе второго эксперимента:

- при однократной дозе (38с и 40 с) наблюдается уменьшение степени полимеризации с уменьшением времени экспонирования;
- при одинаковой дозе (40с и 4x10с) наблюдается рост степени полимеризации при интервальном экспонировании по сравнению с однократным экспонированием;
- при сравнении 1x38с и 2x18с=36с наблюдаются похожие степени полимеризации, что указывает на лучшие характеристики для интервального экспонирования;
- при сравнении 5x8с=40с и 1x40с наблюдаются похожие степени полимеризации, что указывает на снижение наблюдаемого выше эффекта при интервальном экспонировании.

Для повышения степени полимеризации при одинаковой дозе рекомендуется использовать интервальное экспонирование.

Второй эксперимент направлен на выявление влияния интервального экспонирования на отклонение размеров элементов из фоторезиста после проявления от размеров этих элементов на фотошаблоне. Измерения были проведены для топологии с характерным размером проводник/зазор 250/250 мкм. Данный фотошаблон изображен на рисунке 6.

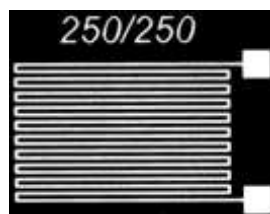


Рис. 10. Тестовый фотошаблон

Было проведено 3 серии экспериментов: повышенная доза экспонирования (40 сек), уменьшенная доза экспонирования (10 сек) и рабочая доза (20 сек) для данного фоторезиста и оборудования. Для проверки влияния интервального экспонирования на разрешение процесса данные дозы набирались из 1, 2 и 4 равных по времени интервалов. Время релаксации между ними было принято равным 3-м минутам для дозы, соответствующей экспонированию в течение 40 сек, 2 минутам – для 20 сек и 1 минуте – для 10 сек.

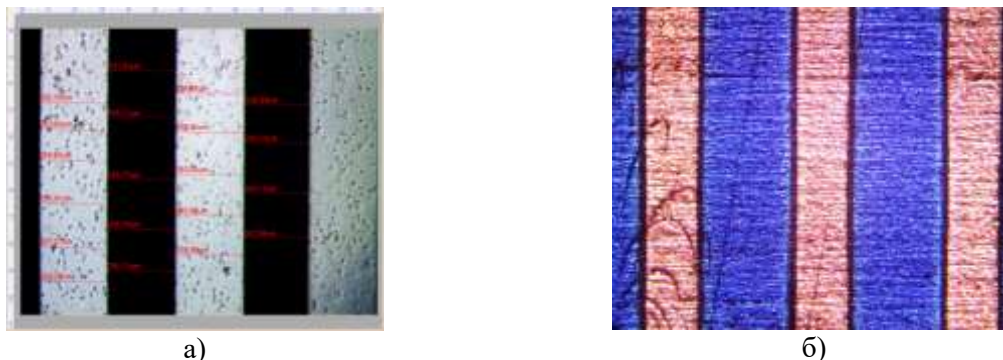


Рис. 11. а) Снимок фотошаблона б) Снимок проявленного фоторезиста на фольгированном стеклотекстолите

Результаты измерения представлены в таблице 1. Они отражают разницу между реальным размером окна фотошаблона (прозрачная часть на рисунке 11а) и размером линии фоторезиста (синие линии на рисунке 11б).

Таблица 1. Отклонения размеров проявленного фоторезиста от размеров на фотошаблоне, мкм

Суммарное время экспонирования	Количество интервалов		
	1	2	4
40 сек	62 мкм	61 мкм	68 мкм
20 сек	48 мкм	44 мкм	49 мкм
10 сек	18 мкм	19 мкм	

Расчет дисперсии измерений указывает на погрешность измерения в 5 мкм. Расчет отклонения размеров указывает на тенденцию уменьшения размеров для 2 интервалов и ухудшения для 4 интервалов. Но данная тенденция выражена слабо и, вероятно, не может быть точно зарегистрирована оптическими микроскопами (250х), используемыми в данной работе. Можно констатировать, что для систем контактного экспонирования печатных плат, интервальное экспонирование не является основным способом повышения разрешения, поскольку эффект от него мал по сравнению с эффектом, приносимым конструкцией оборудования: количеством ламп и их расположением.

Выводы

При воздействии на фоторезист с фотоинициатором повышенной температурой происходит его полимеризация с характерным изменением цвета в зоне термического воздействия.

Для сравнения разных методов экспонирования можно использовать фотошаблон Штоуффера. После процесса травления, делать выводы о степени полимеризации фотополимера легче, чем только после проявления.

При интервальном экспонировании степень полимеризации из-за локального нагрева повышается незначительно. Использование интервального экспонирования для топологии с минимальными размерами свыше 150 мкм нецелесообразно. Данный метод должен быть опробован на установках, предназначенных для получения критических размеров, составляющих десятки микрон.

Литература

1. *Моро У.*, Микролитография: В 2-х частей. Ч. 1: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 605 с.
2. *Андроник М.*, Особенности процесса контактного экспонирования толстых слоев негативного фоторезиста, Сборник статей: Всероссийской научно-технической конференции студентов «Студенческая весна 2015»: Машиностроительные технологии, 2015
3. *Smith B. W., Suzuki K.* (ed.). Microlithography: science and technology. – CRC press, 2007. – Т. 126.
4. *Cookson Eletronics*, Dry Film Photoresist. Technical Process Guide. Troubleshooting Guide //, 2002. 74p.
5. *Tian Y., Shang X., Lancaster M. J.* Fabrication of multilayered SU8 structure for terahertz waveguide with ultralow transmission loss // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS. – 2014. – Т. 13. – №. 1.