

УДК 621.3.095.2

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ ТОЛСТЫХ СЛОЕВ НЕГАТИВНОГО ФОТОРЕЗИСТА

Михаил Михайлович Андроник

Студент 4 курса

Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.С. Боброва,

Ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Точность фотолитографического процесса в большой мере определяется экспонированием. Поскольку контактное экспонирование ограничено явлениями дифракции, то определение и учёт этих ограничений при производстве повышает точность и технологичность изделия в целом. Рассмотренные в статье процессы фотолитографии толстых слоев фоторезиста (толщиной свыше 75 мкм) обусловлены необходимостью формирования диэлектрических слоев в микрокоммутационных платах при высокоплотной интеграции бескорпусных кристаллов, а также при создании плат источников питания, требующих толстых проводников, получаемых по позитивной технологии гальваническим заращиванием полостей в фоторезисте.

Критические размеры (КР), достигнутые после экспонирования фоторезиста, зависят от множества факторов. На рис. 1 показана диаграмма Исикавы, которая наглядно показывает причинно-следственные взаимосвязи между факторами, влияющими на КР.

Анализируя диаграмму, выделяем 2 главных источника погрешностей:

- обеспечение точно заданной дозы экспонирования, которая зависит от параметров оборудования;
- распределение интенсивности по толщине фоторезиста, которое зависит от свойств фоторезиста и от технологических параметров экспонирования, определяемые физическими свойствами актиничного излучения.

В данной работе уделяется особое внимание явлению дифракции. Дифракция происходит при прохождении света через малую щель при длинах волн сопоставимые с размером щели. Важным фактором является расстояние от щели до плоскости наблюдения дифракции. Данные параметры находят отражение в технологии фотолитографии, размер щели – это не что иное, как половина отношения проводник зазор, а расстояние – толщина фоторезиста.

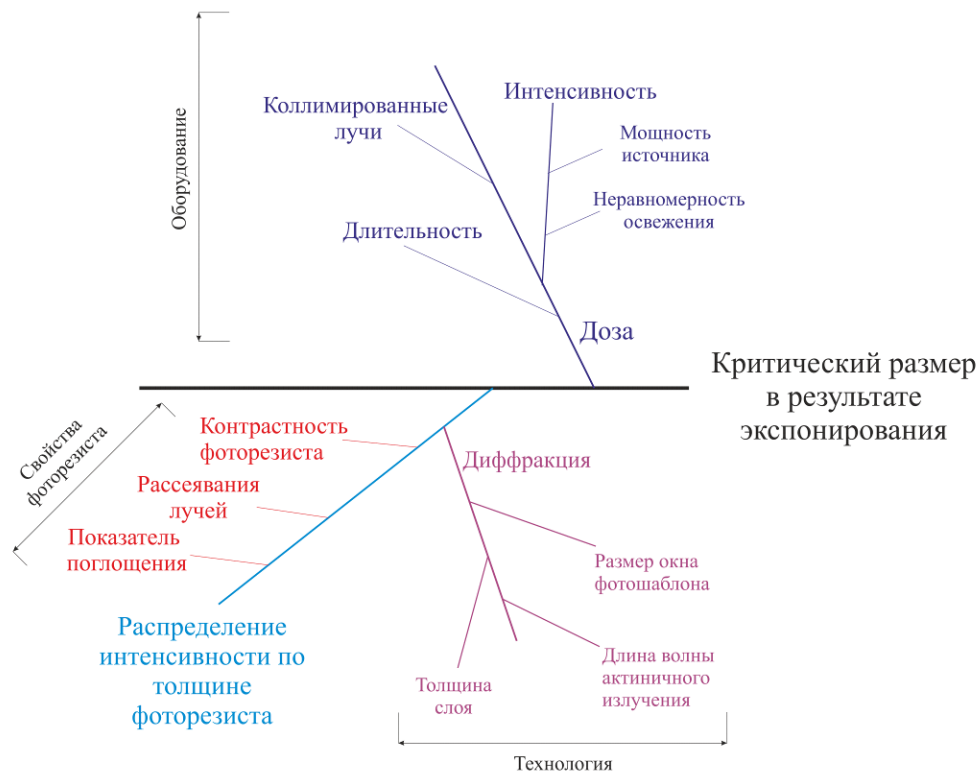


Рис. 1. Диаграмма Исикавы: Факторы, влияющие на выходной параметр КР

Учитывая явление дифракции, можно определить максимальное отношение «высота/ширина», при котором получаемый размер не выходит из заданного допуска. Обычно принято допустимое отклонение КР, получаемого на операции фотолитографии 10% от номинального. Экспонирование обычно несет 25% от погрешности фотолитографии и является наиболее чувствительной операцией [2]. Выходя за рамки фотолитографии, только травление может принести больше вклад в погрешность выходного размера. Но, как было упомянуто выше, толстые слои фоторезиста используются для позитивной технологии гальванического заравнивания проводников, что не требует операции травления.

Учет свойств фоторезиста позволяет перенести результаты моделирования процесса на конкретный случай. Такими свойствами являются:

Контрастность фоторезиста γ (1), определяется через дозу экспонирования необходимую для начала сшивки негативного фоторезиста (E_0) и номинальную дозы экспонирования при данной толщине слоя (E_1). E_0 определяют возможность получения определенных краев при одном и тоже дифракционном рисунке [3].

$$\gamma = \left(\lg \frac{E_1}{E_0} \right)^{-1} \quad (1)$$

Показатель поглощения α (2) указывает расстояние h , которое проходит луч через фоторезист, при котором интенсивность актиничного излучения (I_0) уменьшается в e раз. Данное явление описано законом Бугера-Ламберта-Бера (2) [3].

$$I = I_0 e^{-\alpha h} \quad (2)$$

Рассеивание лучей – отклонение падающего коллимированного пучка на угол ϕ от нормали к поверхности. Излучение, рассеянное в прямом и обратном направлениях, вызывает увеличение основного изображения, увеличивая ширину линии [1].

При моделировании контактного экспонирования толстых слоев фотополимера дальнейшая неотъемлемой задачей является учет свойств фоторезиста.

Правильный выбор материалов, оборудования и технологии позволит снизить экономические затраты на производства изделия. Процесс фотолитографии всегда занимал

большую часть по затратам, его доля составляет примерно 1/3 от общего числа затрат, опережая тестирование и вакуумные процессы. Процесс совмещения и экспонирования затрагивает почти 2/3 из затрат фотолитографии и является наиболее влияющая операция на КР [1].

Экспонирование толстых слоев фоторезиста применяется для:

- Формирования диэлектрических слоев для последующего монтажа безкорпусного утонённого кристалла в углубление. Толщина утонённого кристалла составляет от 75 до 125 мкм, что накладывает ограничения на толщину фоторезиста с диэлектрическими свойствами. Такими фоторезистами являются SU-8 (до 10 МГц) и Cyclotene (может быть использован для ГГц-диапазона). Данный способ, уменьшая протяженность межсоединений, снижает потери и затухание сигнала, повышая предельную рабочую частоту платы.

- Создания плат источников питания. Особые требования предъявляются к проводникам источников питания, а именно к площади поперечного сечения. Для обеспечения миниатюризации платы ширина проводников должно быть наименьшая, следовательно, вырастает высота проводников, которая может превышать 100 мкм. Последующее моделирование проводится для типовых размеров данной технологии, и имеет цель выявления ограничений из-за явлений дифракции. Результаты данной работы могут быть сопоставлены с требованиями по технологическому допуску получаемых проводников.

Моделирование

Данная модель построена с учетом волновой природы света и основана на принципе Гюйгенса. В ее основе лежит скалярная теория дифракции Френеля – Кирхгофа. Расчет проводится для узкой длиной щели. В данной модели интенсивность света рассчитывается, как функция, зависящая от длины волны актиничного излучения λ , размера окна w в фотошаблоне, расстояния от фотошаблона h и от координаты относительно центра ширины линии (x).

Интенсивность рассчитывается по формуле 3:

$$I(x_i) = 0,5 \left[(C(\xi_2) - C(\xi_1))^2 + (S(\xi_2) - S(\xi_1))^2 \right] \quad (3)$$

Где $C(\alpha)$ и $S(\alpha)$ интегралы Френеля:

$$C(\alpha) = \int_0^\alpha \cos \frac{\pi t^2}{2} dt, \quad S(\alpha) = \int_0^\alpha \sin \frac{\pi t^2}{2} dt, \quad (4)$$

а ξ_1 и ξ_2 пределы интегрирования

$$\xi_1 = -\sqrt{\frac{k}{\pi z}} \left(x_i + \frac{W}{2} \right), \quad \xi_2 = \sqrt{\frac{k}{\pi z}} \left(-x_i + \frac{W}{2} \right) \quad (5)$$

Для понимания и вывода формул 3,4,5 рекомендуется литература [3].

Определение минимального окна фотошаблона для достижения допустимого критического размера при толщине 120 мкм

Важным параметром является аспектное соотношение, в данном случае - отношение ширины линии к ее высоте. Достижение его минимального значения обеспечивает миниатюризацию на уровне платы. На данном уровне групповые процессы часто невозможны, что снижает производительность процесса и повышает чувствительность к стоимости изделия. В таких условиях приветствуется использование менее дорогих технологий. Контактная фотолитография выделяется как недорогая по сравнению с проекционной фотолитографией. Определение пределов применимости данной технологии позволит наиболее эффективно использовать ее с минимальными затратами.

Дифракция при контактной фотолитографии является одним из наиболее влияющих факторов для получения критических размеров. Степень коллимации пучка, контрастность фоторезиста тоже являются важными параметрами получения КР.

Допущения:

- идеально коллимированный пучок (365нм);

- отсутствие поглощения, отражение от подложки и рассеяние актиничного излучения.

На рис. 2 показан график распределения интенсивности на нижних слоях фоторезиста, при длинах волн излучения 365 нм, при контактном экспонировании вдоль ширины окна x для различных размеров окон от 1 до 100 мкм.

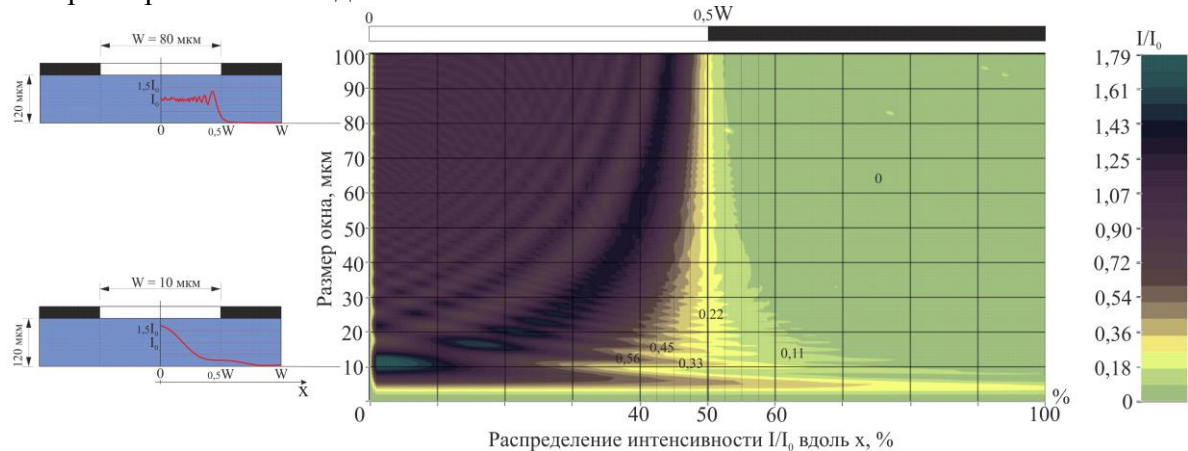


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения вдоль ширины окна фотошаблона при различных ширинах окон w на максимальной глубине фоторезиста

Для наглядности применимости данной модели приведем сведения для 3-х слойного фоторезиста Ordyl Alpha, с толщиной одного слоя – 40 мкм. На рис. 3 иллюстрирован график зависимости дозы экспонирования от толщины слоя фоторезиста Ordyl Alpha серии 300. Серые точки указывают на рекомендуемые изготовителем дозы экспонирования, а красные соответствуют дозами экспериментально полученные в лаборатории 400 юа кафедры МТ11, МГТУ им. Н.Э. Баумана, которые имели наилучшее отношение проводник-зазор. Данные результаты подтвердили предположение о линейном характере данного графика. Линейная зависимость дозы от толщины замечается и у других негативных фоторезистов и подтверждается в определении контрастности фоторезиста в источнике [3]. Другим важным параметром, определяемый из рис.3, является теоретическая минимальная доза начала сшивки фоторезиста, $E_0=25,6$ мДж/см².

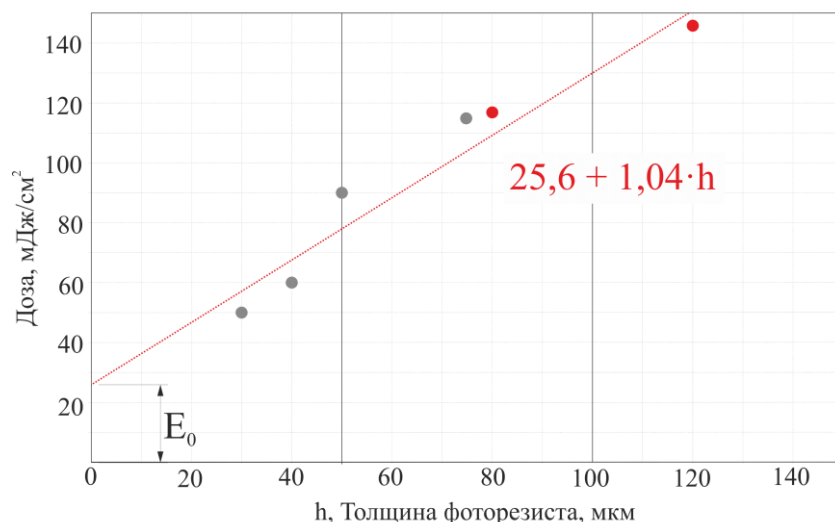


Рис. 3. Зависимость дозы экспонирования от толщины слоя негативного фоторезиста Ordyl Alpha серии 300

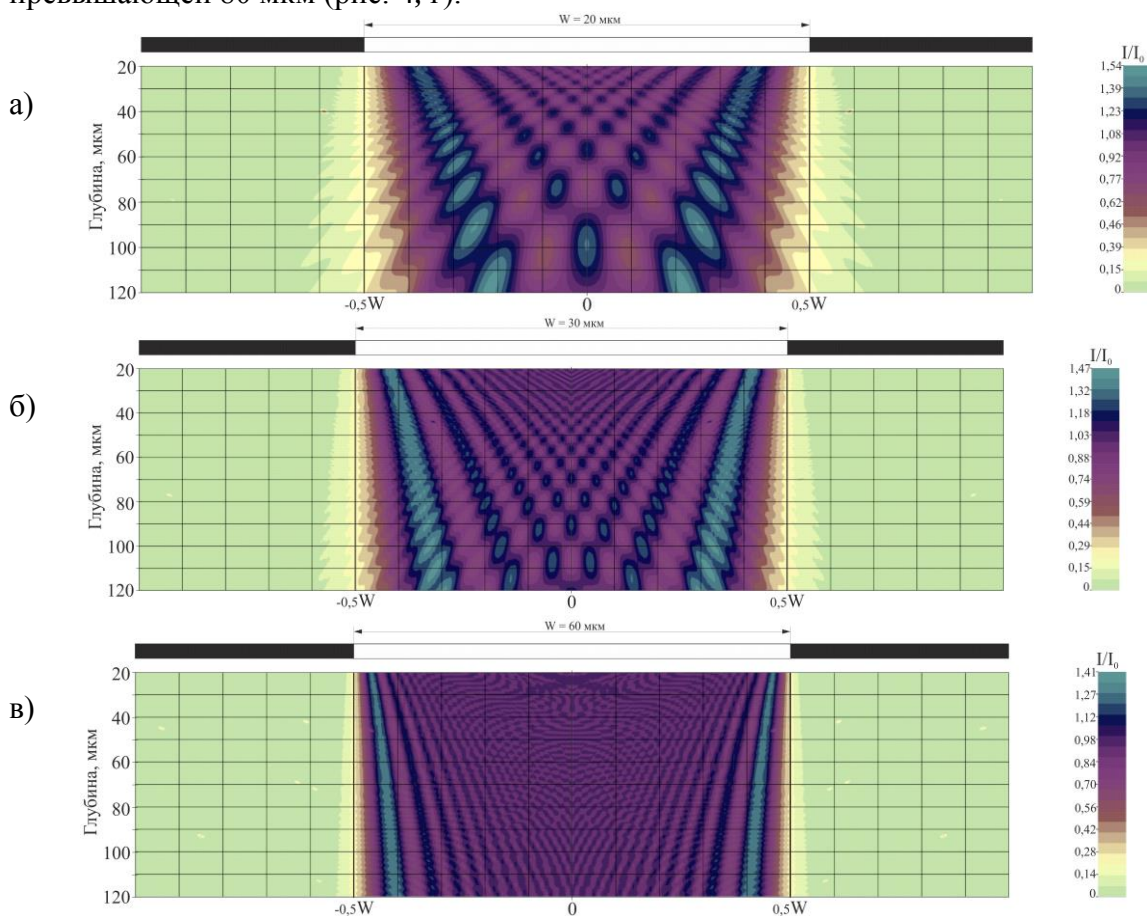
Анализируя рис.2 совместно с рис.3, можно найти толщину, при которой явление дифракции уже недопустимо (точность критического размера превышает требуемый допуск). Из рис. 3 следует, что для $E_1/E_0=0,11$, доза недостаточна для начала процесса сшивки

фоторезиста, $E_1/E_0=0,22$ – толщина сшивки 6 мкм, $E_1/E_0=0,33$ – 23 мкм. В табл. 1 записаны данные расчета отклонения размера от номинального.

Табл.1. Отклонения размера от номинального при различных w

W, мкм	I/I_0	отклонения, %	ширина просвета, мкм	толщина сшивки при данной I/I_0 , мкм
80	0,22	1,25	1	6
60	0,22	2,5	1,5	6
40	0,22	2,5	2	6
30	0,22	10	3	6
20	0,22	20	4	6

В качестве сравнения приведем профиль распределения интенсивности по толщине фоторезиста для ширины окна $w = 20$ мкм (рис. 4, а), $w = 30$ мкм (рис. 4, б) и $w=60$ мкм (рис. 4, в). При $w=20$ мкм заметно выраженное влияние дифракции, отклонения размера от номинального при 100% дозе экспонирования превышает 20%. При $w=30$ мкм, замечается уменьшение влияние дифракции, но отклонение размера на 10 % является недопустимым. Обычно на операции фотолитографии допускается 10 % отклонение критического размера от номинального, из которых 2% составляет погрешность измерения, 3% - погрешность совмещения [2]. Учитывая остальные операции фотолитографии, только 25% из всего отставшего относиться к экспонированию. В результате погрешность экспонирования составляет 1,25%. Такой результат может быть получен только при ширине окна, превышающей 80 мкм (рис. 4, г).



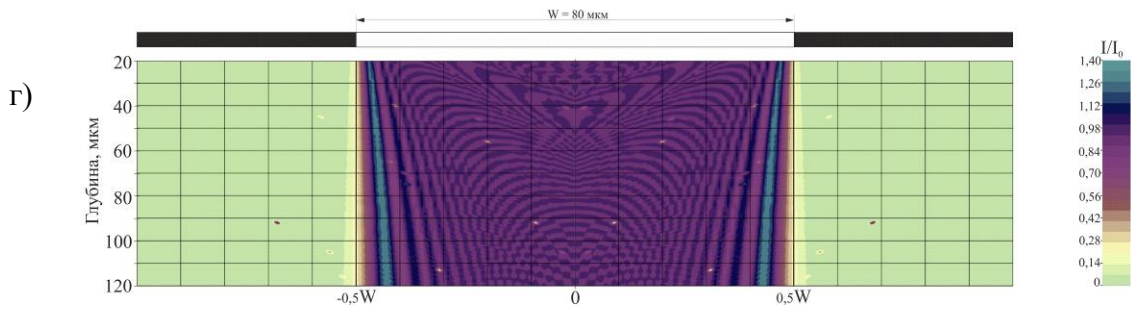


Рис. 4. Распределение интенсивности излучения в поперечном сечении фоторезиста

Зключение

Процесс экспонирования должен проводиться при минимальных отклонениях критического размера от номинального и не должен превышать 1,25% от конечного размера. Моделирование явления дифракции, показывает, что при таких значениях погрешностей для толщины 120 мкм, ширина окна в фотошаблоне должна превышать 80 мкм, что соответствует аспектному соотношению 1:1,5. Дальнейший учет поглощения и рассеяния лучей позволит построить более адекватную модель, с помощью которой будет возможно предсказание фотошаблона, для получения нужной топологии.

Литература:

1. *Моро У.*, Микролитография: В 2-х частей. Ч. 1: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 605 с., ил.
2. *Г. Трапашко*, статья: Контроль микроразмеров в производстве ИС. Задачи и особенности», Электроника Наука, Технология, Бизнес, N3, 2011
3. *С.П. Бычков, В.П. Михайлов, Ю.В. Панфилов, Ю.Б. Цветков*; Под ред. Ю.Б. Цветкова, Физические основы микро- и нанотехнологий: Учеб. Пособие, М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 176 с.: ил.