

чтобы в любом из остальных процессов данной модели выполнялся оператор ЗАПРЕТИТЬ, относящийся к данному процессу. С этого момента модельного времени процесс становится запрещенным и остается в этом состоянии до тех пор, пока не будет выполнен оператор РАЗРЕШИТЬ. Эти операторы позволяют одним процессам управлять активностью других в пределах одной модели.

Переход процесса в запрещенное или разрешенное состояние организуется самой процедурой обработки операторов запрещения и разрешения путем переопределения признака разрешения процесса. Этим признаком служит номер процесса. Если он отрицателен, значит процесс запрещен.

Перевод процесса в состояние ожидания. Так же как языки СИМУЛА, SOL и другие [3, 4], АЛОС позволяет переводить процесс в состояние ожидания при помощи оператора ожидания (ЖДАТЬ). Данный оператор определяет и условие возобновления процесса, т. е. перевода его из состояния ожидания в активное состояние. Причем выполнение процесса при переводе в активное состояние должно быть продолжено с того момента, на котором оно прервалось оператором ожидания. Сред-1) включение этого процесса во временные списки тех линии, которые оговорены как контрольные в операторе ожидания (т. е. при изменении состояния на этих линиях процесс будет продолжен); процесс находится во временных списках до тех пор, пока ожидание не будет прервано;

2) установление для процесса признака ожидания, наличие которого означает, что данный процесс может быть активизирован только из временного списка какой-либо линии; одновременно определяется метка именно данного ожидания этого процесса (число операторов ЖДАТЬ не ограничивается), что позволяет потом продолжить процесс с места, где он был прерван.

Параметрами ожидания, включаемыми в подписание процессов, о которых упоминалось выше, являются, таким образом, признак и метка ожидания и, кроме того, указатель на первый из временных списков, в который был включен данный процесс при переводе его в состояние ожидания.

При продолжении прерванного процесса он исключается из временных списков и переопределяется признак ожидания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лопатин В. С., Медведкова И. Е., Межев В. Е. Основные принципы построения пакета иерархического моделирования ПРИАМ // Автометрия.— 1990.— № 5.
2. Прайс Д. Программирование на языке Паскаль: Пер. с англ.— М.: Мир, 1987.
3. Автоматизация проектирования вычислительных систем. Языки, моделирование и базы данных/Под ред. М. Брайера: пер. с англ.— М.: Мир, 1979.
4. Wirt N. Modula: a language for modular multiprogramming // Software — Practice and Experience.— 1977.— N 7.

Поступило в редакцию 12 октября 1989 г.

УДК 776 : 621.3 : 049.77

В. А. САТЫГА
(Новосибирск)

СКОРОСТЬ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

При получении встречно-штыревого преобразователя (ВШП) с помощью проекционной фотолитографии представляет интерес прогнозирование скорости дифракционного изменения геометрии, используемого в технологии для изменения размеров элементов ВШП при неизменном шаге.

Распределение освещенности в плоскости изображения идеализированной системы проекционной фотолитографии для ВШП с распределением освещенности в плоскости предмета типа меандр выразится формулой

$$E = E_0 + E_m \left(\sin \frac{2\pi}{b_{из}} x + \frac{1}{3} \sin \frac{3 \cdot 2\pi}{b_{из}} x + \dots + \frac{1}{2P+1} \sin (2P+1) \frac{2\pi}{b_{из}} x \right), \quad (1)$$

© 1990 Сатыга В. А.

где $b_{\text{из}}$ — шаг ВПП в плоскости изображения; x — координата в плоскости изображения поперек ВПП.

Формула (1) является упрощенным представлением реального распределения, так как не учитывает таких паразитных факторов, как: 1) фоновая засветка, обусловленная эффектами отражения и рассеяния света; 2) амплитудная модуляция гармоник пространственных частот по радиусу объектива.

Для каждого конкретного объектива модуляция гармоник по радиусу индивидуальна, но закономерность общая: чем дальше от оптической оси, тем пропускная способность ниже.

Влияние приведенных факторов на распределение освещенности в плоскости изображения на порядок ниже, чем по формуле (1), поэтому для простоты конечного выражения ими можно пренебречь.

Для пороговых регистрирующих сред геометрия скрытого изображения при экспозиции определяется [1] формулой

$$Et = \text{const}, \quad (2)$$

где t — время экспонирования.

Поведение реальных регистрирующих сред не всегда соответствует формуле (2). Например, фотопластинки ВР-II при освещенности меньше определенного минимального уровня практически не реагируют на увеличение времени экспонирования. Изображение получается с низкой контрастностью, которая не соответствует техническим требованиям для последующих операций фотолитографии. При использовании фоторезистов искажения могут возникнуть из-за непостоянства толщины фотослоя и других недостатков, присущих методам нанесения фоторезистов на подложку. Кроме того, для выполнения критерия (2), необходимо стабилизировать такие важные элементы технологии, как концентрация и температура проявителя, скорость поступления проявителя в жидком или дисперсном виде.

Известно, что при вариациях времени экспонирования размеры элементов ВПП изменяются. Для выявления зависимости скорости изменения ширины элементов от параметров системы проекционной фотолитографии сделаем следующие математические преобразования.

Продифференцируем уравнение (1) по x :

$$\frac{dE}{dx} = \frac{E_m 2\pi}{b_{\text{из}}} \left(\cos \frac{2\pi x}{b_{\text{из}}} + \cos \frac{3 \cdot 2\pi x}{b_{\text{из}}} + \dots + \cos \frac{(2P+1) 2\pi x}{b_{\text{из}}} \right), \quad (3)$$

уравнение (2) по t :

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{E}{t}, \quad (4)$$

приравняем dE (3) и dE (4) друг к другу:

$$\frac{E_m 2\pi}{b_{\text{из}}} \left(\cos \frac{2\pi x}{b_{\text{из}}} + \dots + \cos \frac{(2P+1) 2\pi x}{b_{\text{из}}} \right) dx = -\frac{E}{t} dt, \quad (5)$$

откуда выделим

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{E}{t} \frac{b_{\text{из}}}{E_m 2\pi \left(\cos \frac{2\pi x}{b_{\text{из}}} + \cos \frac{3 \cdot 2\pi x}{b_{\text{из}}} + \dots + \cos \frac{(2P+1) 2\pi x}{b_{\text{из}}} \right)}. \quad (6)$$

Для упрощения рассмотрим случай $t = t_0$, а x приравняем 0, при этом l — ширина элемента ВПП — равна $b_{\text{из}}/2$. Освещенность в данной точке $E = E_0$. В таком случае (6) примет вид

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{b_{\text{из}} E_0}{t_0 2\pi (1+P) E_m}, \quad (7)$$

где $(2P+1)$ — номер гармоники, определяемый по формуле

$$2P+1 = A \frac{m}{m+1} \frac{b_{\text{из}}}{\lambda}. \quad (8)$$

Здесь A — апертура объектива; m — масштаб проекционной системы, чаще всего равный 10; λ — рабочая длина волны света. Экспериментальным подтверждением условия $E_0/E_m > 1$ может служить следующее: при нарастании времени экспонирования наступает такой момент, когда после фотохимической обработки изображение ВПП сливается. (При позитивном процессе нет дорожек-проводников, при негативном — нет зазоров между проводниками.) В условиях производства представляется трудным выявление конкретных величин E_0 и E_m , тем более в большинстве случаев E_0 не на много больше E_m , поэтому для удобства пользования формулой (7) примем $E_0 = E_m$.

Из практики известно, что дифракционное изменение геометрии идет в двух направлениях. Таким образом, реальная скорость изменения геометрии элемента

в 2 раза больше dx/dt :

$$\frac{dl}{dt} = \frac{b_{\text{из}}}{\pi t_0 (1 + P)}. \quad (9)$$

В технологии важен случай прохождения только первой гармоники пространственных частот. При этом $P = 0$,

$$\frac{dl}{dt} = \frac{b_{\text{из}}}{\pi t_0}. \quad (10)$$

Рассмотрим конкретный пример использования приведенных формул.

Исходная информация: объектив ЭРА-7, диафрагма 2,8, масштаб $m = 70$, $\lambda = 0,556$ мкм, расчетная по масштабу величина $b_{\text{из}} = 10$ мкм; размер проводника при негативной технологии, полученный на фотоматериале, равен 6 мкм при $t_{\text{экс}} = 3$ мин.

Найдем $t_{\text{экс}}$ для получения проводников ВПП шириной, равной $b_{\text{из}}/2$, считая при этом, что распределение освещенности в плоскости предмета — типа меандр.

Определим номер гармоники, который может пройти через объектив: $2P + 1 = A \frac{m}{m + 1} \frac{b_{\text{из}}}{\lambda}$, зная, что $A = 1/2k$, где k — диафрагма.

Определим $2P + 1 \approx 3,2$. Таким образом, через объектив пройдут только первая и третья гармоники пространственных частот, следовательно, $P = 1$.

Упростим формулу (9) до вида

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{b_{\text{из}}}{\pi t_0 (1 + P)}. \quad (11)$$

Из практики известно, что для получения проводников размером $b_{\text{из}}/2$ необходимо уменьшать время экспонирования до величины $t_0 = t_{\text{экс}} - \Delta t$. Тогда

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{b_{\text{из}}}{\pi (t_{\text{экс}} - \Delta t) (1 + P)}; \quad (12)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta l \pi t_{\text{экс}} (1 + P)}{b_{\text{из}} + \Delta l \pi (1 + P)}. \quad (13)$$

Подставим в формулу (13) исходную информацию, считая, что $\Delta l = 6$ мкм — $b_{\text{из}}/2 = 1$ мкм. Тогда $\Delta t \approx 1$ мин 10 с, $t_0 = 3$ мин — 1 мин 10 с = 1 мин 50 с.

ВЫВОДЫ

Предложенная методика позволяет прогнозировать результат при необходимости корректировки геометрии ширины элементов ВПП проекционным способом.

Использование приведенных расчетных формул даст возможность сократить потери материалов при обработке технологических режимов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурский В. Б., Пятецкий Р. Е. Получение и воспроизводимость предельных элементов в проекционной фотолитографии // Автометрия. — 1984. — № 2.

Поступило в редакцию 22 февраля 1989 г.