

СТРАТЕГИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ИММЕРСИОННОЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ЛИТОГРАФИИ

© 2012 г. Н.Н. БАЛАН, В.А. ВАСИН, Е.Н. ИВАШОВ,
П.С. КОСТОМАРОВ, С.В. СТЕПАНЧИКОВ

Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет)
e-mail: Pavel.Kostomarov@gmail.com

Проекционная литография является на сегодняшний день основополагающим технологическим процессом в микроэлектронике, который определяет возможность формирования топологических элементов с нанометровыми размерами при производстве СБИС. Литография представляет собой один из наиболее сложных и дорогостоящих ТП в микроэлектронном производстве, как по применяемым инструментальным методам, так и по технологическим приемам.

К методам повышения разрешающей способности процесса литографии относят: использование внеосевого освещения и источников сложной формы; применение фазосдвигающих промежуточных шаблонов; применение фазовых фильтров; иммерсионную литографию; методы двойной литографии/травления; применение метода коррекции оптического эффекта близости.

IDEF методология моделирования, основана на графическом представлении производственных систем, которая используется для создания функциональной модели, являющейся структурированным изображением функций производственной системы или среды, а также информации и объектов, связывающих эти функции.

Рассмотрим IDEF0 функциональную модель применительно к процессу формирования топологии объектов методом ультрафиолетовой иммерсионной литографии (Рис. 1).

Метод иммерсии в литографии позволяет повысить разрешающую способность путем увеличения числовой апертуры за счет изменения угла полного отражения на границе раздела сред объектив – воздушный зазор (между объективом и пластиной). Но, для использования иммерсионного литографического процесса необходимо применение методов повышения разрешающей способности процесса проекционной литографии, таких как:

- использование внеосевого освещения при экспонировании резиста;
- разработка и применение фазосдвигающих шаблонов (PSM);
- применение методов коррекции оптического эффекта близости [1];
- разработка стратегии технического обслуживания оборудования иммерсионной ультрафиолетовой литографии (ИУФЛ);
- метрологическое обеспечение иммерсионного литографического процесса.

Таким образом, предварительное исследование по совмещению данных методов, позволяет создать процесс формирования топологии объектов методом иммерсионной ультрафиолетовой литографии с проектными нормами не менее 32 нм.

В процессе эксплуатации литографических систем разрешающая способность проекционной литографии ухудшается, что приводит к снижению процента выхода годных. Поэтому, создание математической модели такого технологического процесса, и стратегии технического обслуживания являются задачами актуальными и своевременными.

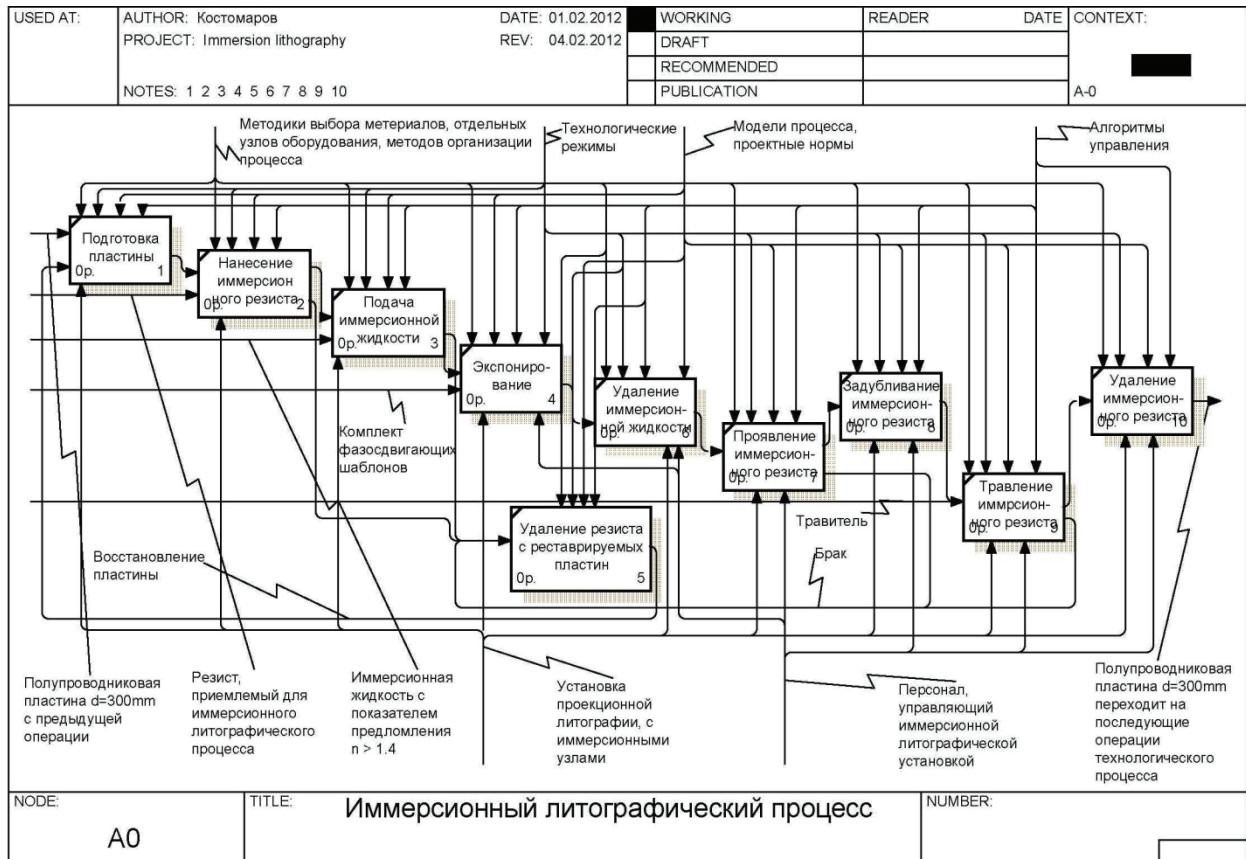


Рис. 1. IDEF0 функциональная модель иммерсионного литографического процесса.

Обычно при постановке задачи профилактики предполагают заданными характеристики надежности системы: функцию распределения времени безотказной работы системы $P(x)$ или отдельных ее частей и функцию распределения времени самостоятельного проявления отказа $\Phi(v)$ и характеристики ремонтпригодности: функции распределения времени различных восстановительных работ, которые можно проводить в системе. Эти характеристики, а также правило (стратегия), в соответствии с которым назначаются сроки проведения восстановительных работ, определяют состояния системы и эволюцию этих состояний во времени [2].

Будим считать, что множество E возможных состояний системы является конечным $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$. В таком случае траектории процесса $x(t)$, описывающего эволюцию состояний системы во времени, являются ступенчатыми функциями. На траекториях этого случайного процесса определим функционал, который при фиксированных характеристиках надежности будет характеризовать стратегию обслуживания исследуемой системы [5]. За конечный отрезок времени $[0, t]$ траектория процесса $x(t)$ задается количеством переходов m , моментами переходов $t_0 = 0 < t_1 < t_2 < \dots < t_m \leq t$ и $E_{i_0}, E_{i_1}, \dots, E_{i_m}$, в которых процесс находится между моментами перехода. Тогда функционал определим как математическое ожидание

$$M \left\{ \sum_{k=0}^{m-1} c_{i_k} (t_{k+1} - t_k) + c_{i_m} (t - t_m) \right\}, \quad (1)$$

где константы c_i можно трактовать как доход, получаемый за единицу времени пребывания в состоянии E_i . При длительной эксплуатации ($t \rightarrow \infty$) функционал (1) стремится к бесконечности. Следует также рассматривать удельный доход, т. е.

$$I = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} M \left\{ \sum_{k=0}^{m-1} c_{i_k} (t_{k+1} - t_k) + c_{i_m} (t - t_m) \right\}. \quad (2)$$

Выражение (1) можно переписать в виде $\sum_{i=1}^n c_i M(X_i(t))$, где $X_i(t)$ –

суммарное время пребывания процесса $x(t)$ в состоянии E_i за отрезок времени $[0, t]$, выражение (2) в виде

$$I = \sum_{i=1}^n c_i \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{M(X_i(t))}{t} = \sum_{i=1}^n c_i k_i. \quad (3)$$

Пределы, входящие в выражение (3), можно трактовать как долю времени, которую процесс $x(t)$ провел в соответствующем состоянии E_i . С другой стороны, если ввести в рассмотрение индикатор события E_i

$$\delta_{E_i}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } x(t) = E_i, \\ 0, & \text{если } x(t) \neq E_i, \end{cases}$$

то можно записать

$$M(X_i(t)) = \int_0^t M(\delta_{E_i}(\tau)) d\tau = \int_0^t P\{x(\tau) = E_i\} d\tau.$$

Тогда выражение

$$\frac{M(X_i(t))}{t} = \frac{1}{t} \int_0^t P\{x(\tau) = E_i\} d\tau \quad (4)$$

имеет смысл вероятность того, что в произвольно выбранный момент времени τ из отрезка $[0, t]$ имеет место событие $\{x(\tau) = E_i\}$. Поэтому

$k_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{M(X_i(t))}{t}$ можно определить как вероятность того, что в произвольно выбранный момент $\tau \in [0, \infty)$ имеет место событие $\{x(\tau) = E_i\}$.

Для регенерирующего процесса функционал I может быть определен как

$$I = \sum_{i=1}^n c_i k_i = \sum_{i=1}^n c_i \frac{M_i}{M} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i M_i}{M} \quad (5)$$

где k_i – отношение среднего времени M_i , проведенного в состоянии E_i за период регенерации, к середине длительности этого периода M .

Поведение процесса $x(t)$ зависит от функции распределения времени безотказной работы системы $P(t)$. Функция распределения времени ξ самостоятельного проявления отказа $\Phi(x)$ и характеристик, определяющих сроки проведения регенерирующих факторов (проведение предупредительных профилактик назначается через случайное время η , распределенное по закону $G(x)$). Следовательно, от этих функций зависят и средние длительности M и M_i ($i = \overline{1, n}$).

Считаем, что период регенерации начинается в момент полного обновления системы и в этот же момент назначается очередная профилактика. Тогда запишем

$$M = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty B(x, v, y) dG(x) d\Phi(v) dP(y),$$

$$M_i = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty A_i(x, v, y) dG(x) d\Phi(v) dP(y),$$

где через $B(x, v, y)$ обозначена средняя длительность периода регенерации процесса $x(t)$ при условии, что в начале периода начинает функционировать система, у которой время безотказной работы $\xi = y$, время самостоятельного проявления отказа $\zeta = v$, профилактика назначена через время $\eta = x$, т. е. при условии $\{\xi = y, \zeta = v, \eta = x\}$; $A_i(x, v, y)$ среднее время пребывания процесса $x(t)$ в состоянии E_i на периоде регенерации при условии осуществления события $\{\xi = y, \zeta = v, \eta = x\}$. Обозначим далее

$$A(x, v, y) = \sum_{i=1}^n c_i A_i(x, v, y).$$

Тогда исследуемый функционал (5) можно записать как дробно-линейный функционал вида

$$I = I(G, \Phi, P) = \frac{A(x, v, y) dG(x) d\Phi(v) dP(y)}{B(x, v, y) dG(x) d\Phi(v) dP(y)} \quad (6)$$

где $A(x, v, y)$ - средний доход, полученный на периоде регенерации, при условии выполнения события $\{\xi = y, \zeta = v, \eta = x\}$ [3].

Если процесс $x(t)$, описывающий эволюцию состояний системы во времени, принимает конечное множество значений и является регенерирующим, то функционал, характеризующий качество работы системы, имеет вид дробно-линейного функционала (6) относительно функции распределения времени безотказной работы $P(t)$, функции распределения времени самостоятельного проявления отказа $\Phi(x)$ и функции распределения $G(x)$, определяющий периодичность проведения предупредительных профилактик.

В выражении (6) функция $A(x, v, y)$ и $B(x, v, y)$ имеют смысл условных математических ожиданий при условии выполнения события $\{\xi = y, \eta = x, \zeta = v\}$.

Эти выводы могут быть использованы при определении характеристик функционирования оборудования ИУФЛ, которое интенсивно развивается и совершенствуется в последние 15 лет.

Метод ИУФЛ позволяет значительно увеличить числовую апертуру проекционных систем за счет изменения угла полного отражения на границе раздела сред объектив - воздушный зазор (между объективом и пластиной). NA объектива определяется синусом максимального угла прохождения луча через объектив.

$$NA = \sin \theta_{max}.$$

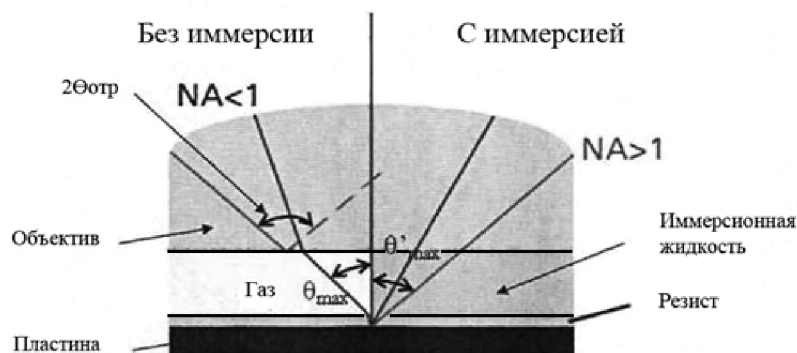


Рис. 2. Прохождение лучей через объектив.

Используя иммерсионные жидкости вместо воздушной среды можно получить значения числовой апертуры $NA > 1$. Рассмотрим прохождение лучей через объектив (Рис. 2). Числовая апертура определяется углом падения луча на объектив, при котором луч проходит через него, не испытывая полного отражения на границе раздела сред объектив - воздушная среда [4].

В соответствии с законом преломления получим:

$$\frac{n_{объектива}}{1} = \frac{\sin \theta_{пад}}{\sin \theta_{max}} \text{ — без иммерсии;}$$

$$\frac{n_{объектива}}{n_{media}} = \frac{\sin \theta_{пад}}{\sin \theta'_{max}} \text{ с применением иммерсионной жидкости}$$

$$\sin \theta'_{max} = \frac{\sin \theta_{пад} \cdot n_{media}}{n_{объектива}} = n_{media} \cdot \sin \theta_{max},$$

где n_{media} — коэффициент преломления иммерсионной жидкости.

Таким образом, угол падения луча на объектив, при котором происходит полное отражение света на границе раздела сред объектив - иммерсионная жидкость, увеличивается, что влечет увеличение числовой апертуры (Рис. 3). Увеличение числовой апертуры означает, что лучи, падающие под большими углами, попадут на пластину,

т.е. количество информации, пропускаемой объективом увеличится, повышая разрешение.

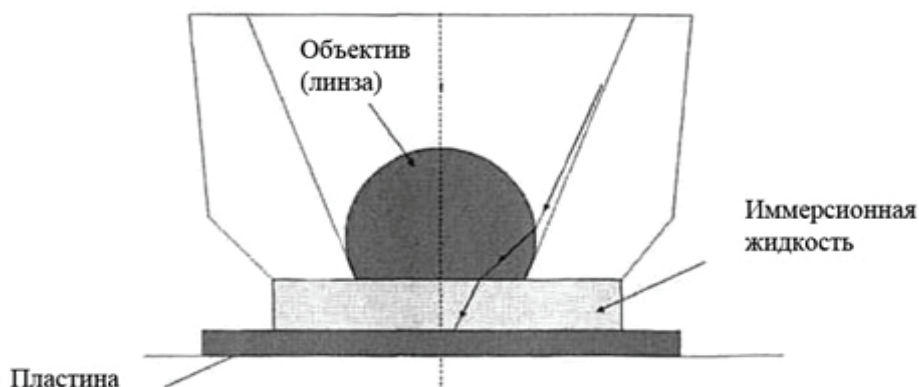


Рис. 3. Схема увеличения числовой апертуры.

Числовая апертура такой система вычисляется по формуле:

$$NA = n_{media} \cdot \sin \theta_{max}.$$

Техническое воплощение идеи использования иммерсионных жидкостей состоит в закачке под давлением жидкости с одной стороны объектива и одновременной откачке ее с другой. Для устранения оптических искажений при прохождении луча через иммерсионную жидкость, необходимо чтобы поток закачиваемой жидкости был ламинарным. В Табл. 1 приведены значения коэффициентов преломления и получаемой числовой апертуры NA [5].

Таблица 1

Иммерсионная жидкость	n_{media}	NA_{max}
Де-ионизованная вода	1,44	1,3
Жидкие полимеры	1,6	1,5

Выводы

При создании оборудования ИУФЛ возникает проблема разработки стратегии технического обслуживания, которая позволила бы получить от эксплуатации системы максимально возможный эффект. Поэтому задачи профилактики ставятся как задачи экстремальные и их можно назвать оптимальными задачами надежности.

Проблемы создания проекционных систем с источниками излучения с длиной волны меньше 193 нм поставили под угрозу тенденцию к миниатюризации размеров элементов СБИС. Поэтому особое значение приобрели конструкторско-технологические методы, позволяющие достигать разрешения выше классических значений релейской оптики за счет учета особенностей конкретного технологического оборудования, применяемых материалов и режимов обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Y. Cui, et al. Is Model-based Optical Proximity Correction Ready for Manufacturing? Study on 0.12 urn and 0.175 urn DRAM Technology // Proc. SPIE Microlithography. 2002. 4691. p. 67-75.
2. Барзилович Е.Ю., Беляев В.А., Каштанов В.А. и др. Вопросы математической теории надежности; Под ред. Гнеденко Б.В. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с., ил.
3. Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. Организация обслуживания при ограниченной информации о надежности системы. М., «Сов. радио», 1975, 136 с. с ил.
4. Hand A. Double Patterning Wrings More From Immersion Lithography // Semiconductor International. 2007. January. 17 p.
5. IMEC. CMOS based technology R&D programs URL http://www.imec.be/ScientificReport/SR2008/HTML/files/pdf/Brochure_CMORE.pdf