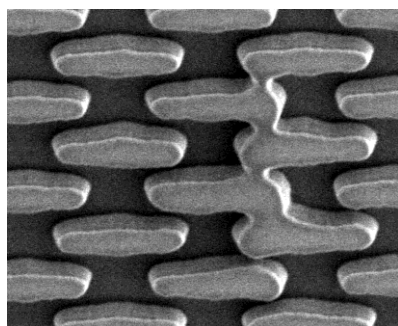


## МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ОРИГИНАЛОВ ТОПОЛОГИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ НА ФОТОШАБЛОНАХ, ОСНОВАННЫЕ НА МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ФОТОЛИТОГРАФИИ

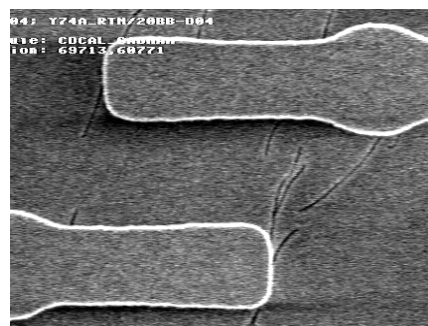
асп. <sup>1</sup>Титко Д.С.

<sup>1</sup>УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,  
Минск

**Введение.** Процесс производства оригиналов топологии полупроводниковых приборов на фотошаблонах характеризуется повышением сложности формируемых топологических структур [1]. Соответственно повышается сложность технологии изготовления и стоимость фотошаблонов, которая для проектных норм 65-22 нм может превосходить один миллион евро за комплект [2]. Поэтому большое значение имеет повышение процента выхода годных при одновременном обеспечении 100% вероятности отсутствия дефектов в процессе использования фотошаблонов в кристалльном производстве, что требует так называемой «бездефектной» [3, 4] технологии производства. Существующая технология предполагает наличие в технологическом цикле производства оригиналов топологии на фотошаблонах обязательной операции автоматического контроля топологических структур на соответствие проектным данным. При этом, дефекты, обнаруженные в результате автоматического контроля, устраняются при помощи лазерного [4, 5] или электронно-лучевого [6] оборудования для исправления как прозрачных, так и непрозрачных дефектов. В первом случае используется технология лазерно-стимулированного (электронно-стимулированного) осаждения метало-органического вещества из газообразной фазы, во втором – технология лазерной (электронно-лучевой) сублимации остатков металлизированной маски, как правило, при помощи импульсного лазера с высокой плотностью энергии в импульсе (с продолжительностью импульса порядка сотен фемтосекунд). И та, и другая технологии несут в себе существенно большие риски травмирования маски и подложки фотошаблона, чем традиционная технология экспонирования фоторезиста лазерным (электронным) лучом, в силу чего вероятность получения бракованных изделий при формировании аналогичного рисунка является существенно более высокой.



*Топология пластины на электронном  
микроскопе*

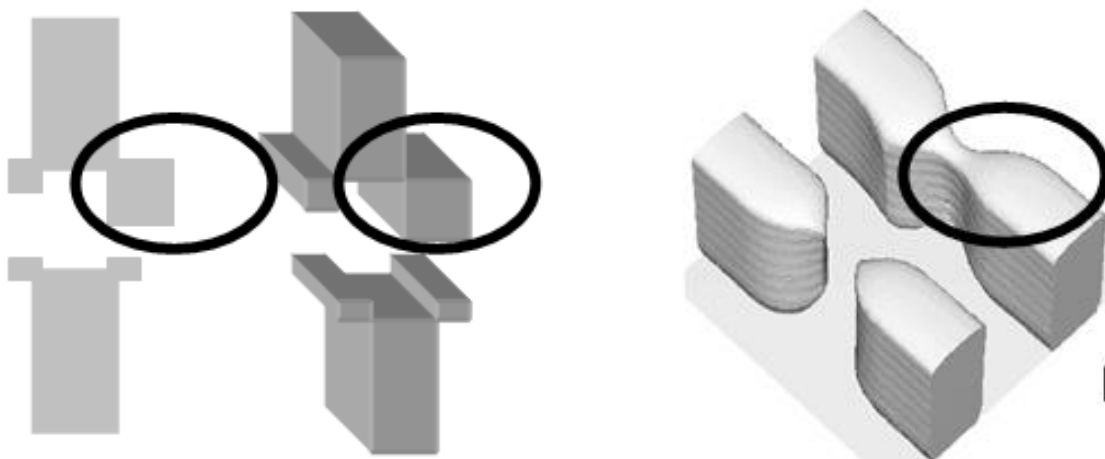


*Топология фотошаблона на  
электронном микроскопе*

*Рис. 1. Влияние групповых дефектов на процесс формирования топологии*

**Постановка задачи.** Особое место среди всех типов дефектов топологии

занимают дефекты, которые не прорабатываются проекционной оптической системой установки совмещения и мультипликации при последующем переносе изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину, но в совокупности с другими элементами топологии могут вызвать появление критичного дефекта. Существует два типа подобных дефектов – это групповые дефекты конструктивных структур (рисунок 1) [7] и дефекты элементов OPC (optical proximity correction – коррекции оптической близости) (рисунок 2). Степень критичности таких дефектов можно определить только при помощи комплексной оценки соответствующих фрагментов топологии.



*Сериф, увеличенный на 175 нм*

*Топология после проекционного переноса на пластину на фотошаблоне*

*Рис. 2. Влияние дефектов элементов OPC на процесс формирования топологии*

Таким образом, необходим подход, обеспечивающий возможность минимизации количества исправляемых дефектов, определения критичности групповых дефектов конструктивных структур и функциональных дефектов элементов OPC [9, 10].

На современных кристалльных производствах оценка фотолитографической значимости (критичности) дефектов, необходимая для решения трех выше обозначенных задач, производится в процессе выполнения операции фотолитографии на полупроводниковой пластине при помощи установки совмещения и мультипликации или путем выборочного моделирования в исследовательском режиме [8], потому что 100% моделирование дефектов, обнаруженных в процессе контроля фотошаблонов, не представляется возможным. Это обусловлено с одной стороны тем, что существующие системы моделирования процессов фотолитографии являются громоздкими в силу своей универсальности, неоднозначными в настройке и обладают очень низким быстродействием, с другой стороны, эти системы слабо связаны с используемым контрольным оборудованием, что не позволяет проводить предварительную обработку дефектов топологии с целью минимизации количества моделируемых фрагментов топологии.

Учитывая вышеизложенное, перспективным является новый подход к процессу производства фотошаблонов, обеспечивающий возможность оперативной оценки фотолитографической значимости дефектов топологии без выполнения операции проекционного переноса изображения на полупроводниковую пластину или перехода в исследовательский режим.

**Классификация методов контроля.** Существующие виды контроля оригиналов топологии на фотошаблонах и отечественные установки, их реализующие, представлены на рисунке 3. Как видно из рисунка, определенные отличия имеют место при контроле дефектов у изготовителя фотошаблонов и у их потребителя. В первом

случае необходимым является контроль критических размеров и совмещаемости комплекта фотошаблонов, контроль на соответствие проектным данным, контроль идентичности мультиплицированных фрагментов топологии и контроль «мягких» дефектов (дефектов, не имеющих стабильного местоположения). Во втором случае контроль критических размеров и совмещаемости комплекта не является обязательным, но может применяться, так называемый, In-Situ контроль. Контроль In-Situ выполняется как правило перед особо ответственными экспозициями, где должны быть исключены все возможные случайности. При этом необходимо проконтролировать фотошаблон после загрузки в степпер (установка совмещения и мультипликации) или сканер (установка сканирующего переноса изображений) и перед выполнением операции проекционного переноса изображения. Такой контроль проводится путем предварительной пропечатки топологического рисунка на стеклянной или кварцевой пластине с последующим автоматическим контролем этого рисунка в проходящем свете. Однако ни один из вышеупомянутых способов контроля не гарантирует отсутствие групповых дефектов и функциональных дефектов элементов, предназначенных для коррекции эффектов оптической близости.



Рис. 3. Виды контроля оригиналов топологии на фотошаблонах

**Описание нового метода.** Новый метод контроля оригиналов топологии полупроводниковых приборов на фотошаблонах основан на применении имитационных моделей, обеспечивающих возможность оперативного моделирования процесса проекционного переноса топологических структур с фотошаблона на полупроводниковую пластину. Данный подход позволяет определить степень влияния обнаруженного дефекта на технологический процесс проекционного переноса изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину и существенно повысить процент выхода годных, что особенно важно при суб-стананометровых технологиях. Большая часть дефектов, обнаруживаемых на фотошаблонах, не прорабатывается на полупроводниковых пластинах, поэтому использование средств оперативного моделирования делает процесс изготовления фотошаблонов существенно более дешевым и надежным.

01 Прокол	02 Островок	03 Выступ 1	04 Выступ 2	05 Выступ 3
06 Выступ 4	07 Вырыв 1	08 Вырыв 2	09 Вырыв 3	10 Вырыв 4
11 Выступ у1	12 Выступ у2	13 Выступ у3	14 Выступ у4	15 Выступ у5
16 Выступ у6	17 Выступ у7	18 Выступ у8	19 Вырыв у1	20 Вырыв у2
21 Вырыв у3	22 Вырыв у4	23 Мостик 1	24 Мостик 2	25 Ув.размер
26 Ум.размер	27 Нет элем-та	28 Избыток1	29 Избыток 2	30 Избыток 3
31 Избыток 4	32 Усечение 1	33 Усечение 2	34 Усечение 3	35 Усечение 4
36 Смещение1	37 Смещение2	38 Смещение3	39 Смещение4	40 Смещение5
41 Смещение6	42 Смещение7	43 Смещение8	44 Полутон	45Полут.точка
46 Полут.точк				

Рис. 4. Классификация по геометрическим соотношениям между дефектами и конструктивными элементами топологии

Оригинал топологии современной интегральной микросхемы, содержит сотни миллионов элементов топологии. Рисунок такой сложности изготавливается более чем за 1 000 миллиардов вспышек, что даже при самой высокой надежности технологического процесса, которая может составлять 10-10 операций на сбой, не оставляет сомнений в наличии дефектов, многие из которых могут оказаться

критичными. С другой стороны, необходимость использования техники повышения разрешения, делает фотошаблоны очень дорогими, что в случае наличия технологических проблем и, соответственно, при проценте выхода годных ниже определенного порогового уровня, делает производственный процесс экономически не целесообразным.

Предлагаемый подход основан на введении новой группы операций – операций, обеспечивающих оперативное моделирование последующего процесса проекционного переноса изображений с фотошаблона на полупроводниковую пластину.

Первой операцией процесса моделирования проекционного переноса изображений является операция построения воздушного изображения. Эта операция основана на моделировании процесса распространения волнового фронта от источника излучения через фотошаблон и объектив мультипликатора до плоскости изображения, расположенной на поверхности полупроводниковой пластины, покрытой тонким слоем фоторезиста. При этом используются специализированные программы, каждая из которых позволяет построить только ограниченный класс моделей, но при этом обладает существенно более высоким быстродействием.

Второй операцией является моделирование процесса распространения изображения, построенного объективом мультипликатора, в фоторезисте. При этом решается объемная задача, причем глубина воздействия передаваемой энергии соответствует глубине резкости объектива и определяется по формуле:

$$DoF = \frac{\lambda}{NA^2} \times k_2$$

где,  $DoF$  – глубина фокуса проекционной оптической системы,  $\lambda$  – длина волны экспонирующего излучения,  $NA$  – числовая апертура оптической системы,  $k_2$  – коэффициент, определяющий технологический уровень системы.

Третьей операцией является операция оценки фотолитографической значимости дефекта фотошаблона. При этом в изображении, построенном в результате выполнения двух предыдущих операций, осуществляется поиск элементов изображения дефектов фотошаблона.

На рисунке 4 показана классификация, выполненная на основании анализа геометрических соотношений между дефектами и конструктивными элементами топологии, соответствующая стандартам SEMI P23893, SEMI P23-0200. Ниже приведены наименования и краткое описание классов дефектов:

1. прокол – светлое вкрапление на темном элементе топологии;
2. островок – темное вкрапление на светлом элементе топологии;
- 3-6. выступ на границе элемента топологии;
- 7-10. вырыв на границе элемента топологии;
- 11-18. выступ угла элемента топологии;
- 19-22. вырыв угла элемента топологии;
- 23-24. мостик внутри элемента топологии;
- 25-26. увеличение (уменьшение) размера элемента по обеим координатам;
27. отсутствие конструктивного элемента топологии;
- 28-35. увеличение (уменьшение) размера элемента по одной координате;
- 36-43. ошибка расположения (координат привязки) элемента топологии;
- 44-46. полутоновой дефект.

Каждая из подгрупп характеризуется своим набором элементов изображения. Фотолитографическая значимость дефекта определяется путем анализа наличия одного или нескольких элементов изображения соответствующей подгруппы типов дефектов.

На практике может быть использована упрощенная классификация, которая также предоставляет всю информацию, необходимую для определения критичности обнаруженных дефектов:

проколы и островки в маскирующем покрытии (1-2);  
выступы и вырывы на краю элементов топологии (3-10);  
дефекты углов элементов топологии (11-22);  
перемычки между элементами топологии и разрывы (23-24);  
недостающие или лишние конструкционные элементы топологии (27);  
ошибки координат элементов топологии (36-43);  
ошибки размеров элементов топологии (25-26, 28-35);  
полутонные дефекты (44-46).

В результате автоматического контроля топологии фотошаблона кроме информации, представленной в ведомости дефектов, по каждому дефекту формируется файл с описанием топологии этого дефекта, содержащий полутонную информацию о дефекте в контексте топологии. При этом каждый пиксел представляется однобайтным кодом.

Размерность формируемой модели является одним из параметров настройки системы распознавания дефектов. В результате взаимодействия с системой моделирования определяются параметры «тип структуры» и «признак фотолитографической значимости дефекта». Параметр «тип структуры» указывает базовый тип структуры моделируемого участка топологии – одномерная структура типа линия-промежутки или двумерная структура типа контактное окно.

Для настройки системы моделирования на конкретный тип установки совмещения и мультипликации используются такие параметры оптической системы и фоторезистивной маски, как числовая апертура объектива, разрешение, длина волны экспонирующего излучения, глубина резкости объектива, коэффициент когерентности, тип и толщина фоторезиста.

Результатом работы системы моделирования является оценка фотолитографической значимости дефекта, которая позволяет определить проработается ли заданный дефект в процессе проекционного переноса изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину.

**Заключение.** Таким образом, предложенный метод контроля оригиналов топологии на фотошаблонах обеспечивает возможность оперативной оценки фотолитографической значимости дефектов маскирующего покрытия фотошаблона, обнаруженных в процессе автоматического контроля фотошаблонов, без выполнения операции физического проекционного переноса изображений с фотошаблона на полупроводниковую пластину на стейпере или перехода в исследовательский режим, что, в свою очередь, позволяет уменьшить количество операций исправления дефектов маски фотошаблонов, обеспечивает возможность детектирования групповых дефектов конструкционных структур и делает возможным функциональный контроль элементов ОРС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Future Mask Writers Requirements for the Sub 10 nm Node Era / Mahesh Chandramouli, Frank Abboud, Nathan Wilcox, Andrew Sowers, Damon Cole // Bacus News, Vol.28, Issue 11, November 2012.*
2. *Analyzing EUV Mask Costs. / M.Lercel, Bryan Kasprovicz / Bacus News, Vol. 33 Issue 2, February 2017 - pp.1-7.*
3. *Application of actinic mask review system for the preparation of HVM EUV lithography with defect free mask / Jihoon Na, Donggun Lee, Changhwan Do и др.// Bacus News, Vol.33 Issue 7, July 2017 – pp.1-8.*
4. *A complete set of the special process equipment for the defect-free production of reticles / S.M. Avakaw, V.A. Iouditski, L.V. Pushkin, A.A. Tsitko // SPIE – 2007. – Vol. 6533 – P. 65331B 1-65331B-9.*

5. *Femtosecond Laser Mask Repair* / Alfred Wagner, Richard Haight, Peter Longo, Michael Schmidt u др. // *Microlithography World*, February 2003.
6. *Phase-shifting photomask repair and repair validation procedure for transparent & opaque defects relevant for the 45 nm node and beyond* / Christian Ehrlich, Uve Buttgereit, Klaus Boehm, Thomas Scheruebl, Klaus Edinger, Tristan Bret. // Vol. 24, Issue 7, July 2008 – pp.1-8.
7. *Jim Wiley / Reticle Defects in the New (Low  $k_1$ ) Era* // *Sub-wavelength Lithography// KLA-Tencor Workshop*, 1999, pp.1-29.
8. *Defect Printability Analysis by Lithographic Simulation from High Resolution Mask Images* / George Chen, James N. Wiley, Jen-Shiang Wang ... // *Bacus 2009-M-LMC-manuscript*, pp.1-9.
9. *Аваков, С.М. Лазерная литография. Коррекция формы субмикронных элементов.* / Аваков С.М., Беспалов В.А., Овчинников В.А., Пушкин Л.В., Тутко Е.А. // *Электроника НТБ.* - 2009. - №8, С. – 82-85.
10. *Model based correction of placement error in EBL and its verification* / Sergey Babin, Sergey Borisov, Vladimir Militsin, Tadashi Komagata, Tetsurou Wakatsuki // *Bacus News Vol. 32, Issue 7, July 2016 – pp.1-7.*