

УДК 681.3

МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТОПОЛОГИИ ПЛАНАРНЫХ СТРУКТУР ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

*Лауреат Государственной премии Республики Беларусь, докт. техн. наук АВАКОВ С. М.,
ДРОГУН Е. А., РУСЕЦКИЙ В. А., ТИТКО Д. С., ТИТКО Е. А., ШОЛОМИЦКИЙ В. Г.*

Научно-производственное республиканское унитарное предприятие «КБТЭМ-ОМО»

Как известно, операция автоматического контроля топологии интегральных микросхем является одной из самых ответственных при производстве изделий микро- и нанoeлектроники. Так, оборудование для автоматического контроля оригиналов топологии, например, является самым дорогим во всей технологической цепочке кристалльного производства, что обусловлено, с одной стороны, его высокой сложностью, а с другой – высокой ценой возможного пропуска дефектов. Один дефект, пропущенный в оригинале топологии на фотошаблоне, может привести к убыткам, исчисляемым десятками миллионов евро.

Одной из основных задач, возникающих при проектировании оборудования для автоматического контроля топологии, является выбор метода контроля. Ошибка при выборе метода с высокой вероятностью сделает разработанную установку непригодной к эксплуатации. Для решения этой задачи необходимо определить алгоритм, позволяющий в соответствии с классификацией методов автоматического контроля топологии сделать правильный выбор метода в зависимости от характеристик контролируемых объектов и условий контроля. На сегодняшний день в [1–15] отсутствует классификация, основанная на анализе существующего и разрабатываемого оборудования, а также на анализе перспективных задач автоматического контроля топологии. Отсутствует методика, позволяющая на основании анализа характеристик контролируемых объектов и условий контроля выбрать метод контроля, чем и

обусловлена актуальность рассматриваемой проблемы.

Общая характеристика методов автоматического контроля топологии планарных структур. Существующие методы автоматического контроля топологии планарных структур можно разбить на две большие группы – методы анализа параметров топологии и методы сравнения с эталоном.

Методы анализа параметров топологии предполагают поиск дефектов путем проверки выполнения определенного набора правил или анализа параметров, заданных проектировщиком. Эта группа методов позволяет идентифицировать локальные дефекты топологии, такие как проколы, островки, вырывы, выступы, а также дефекты, связанные с нарушением предельных норм проектирования (например, допусков на толщину проводника, на расстояния между проводниками и т. п.). Принципиальными особенностями этой группы методов являются низкая чувствительность к дефектам положения и размеров элементов топологии, а также отсутствие необходимости точного совмещения двух изображений в отличие от методов сравнения с эталоном.

В силу вышеуказанных особенностей методов этой группы применяются в тех случаях, когда требования к точности положения и размеров элементов топологии являются менее жесткими, чем требования к локальным дефектам, что имеет место, например, при контроле печатных плат, масок кинескопов и панелей жидкокристаллических экранов. Следует отме-

тить, что этими методами не обнаруживаются дефекты, связанные с наличием лишних или отсутствием конструктивных элементов топологии, потому что для их обнаружения требуется координатная информация из системы проектирования, отсутствующая в данном случае.

В общем случае методы анализа параметров топологии предполагают наличие двух этапов обработки. Первый этап включает структурирование (сегментацию) изображения и маркировку отдельных элементов для их последующей интерпретации и анализа, второй – анализ характеристик элементов изображения, выделенных на первом этапе, и проверку выполнения правил и норм проектирования. Для реализации процессов структурирования изображений используется специфическая для каждого конкретного объекта информация, так называемая морфология низкого уровня. Отличие метода анализа критериев корректности элементов рисунка, формируемых в процессе обучения, состоит в том, что формирование правил производится в процессе обучения.

В группу методов анализа параметров топологии входят следующие методы:

- группового анализа элементов рисунка;
- индивидуального анализа элементов рисунка;
- анализа критериев корректности элементов рисунка, формируемых в процессе обучения.

Метод группового анализа предполагает наличие возможности анализа топологии без разбиения ее на отдельные элементы. Так, например, могут контролироваться дефекты типа островков и проколов, вырывов и выступов, размеры которых заведомо меньше размера минимального элемента топологии (проектной нормы). При этом фрагмент рисунка считается дефектным в том случае, если он содержит изолированный объект (островок или прокол) с размерами менее проектной нормы, или край элемента, неровность которого превышает размер минимального критичного дефекта (вырыв или выступ). К данному классу относятся также методы контроля маскирующих покрытий фотошаблонов и полупроводниковых пластин, использующие принцип так называемого оптического концентратора. Такой метод реализован, например, в установках контроля поверх-

ности полупроводниковых пластин серии Surfscan компании KLA-Tencor [9] и в отечественных установках контроля полупроводниковых пластин на наличие привнесенных дефектов ЭМ-6479.

Метод индивидуального анализа элементов рисунка (морфологического анализа) предполагает предварительный просмотр изображения с целью распознавания каждого элемента рисунка в отдельности. При этом скорость контроля будет существенно ниже, чем в предыдущем случае, однако качественно расширится класс обнаруживаемых дефектов. При таком анализе появляется возможность контроля выполнения определенных правил и норм проектирования, применимых к каждому элементу рисунка в отдельности (например, допустимый интервал значений ширины линии, минимально допустимое расстояние между проводниками, допуск на изменение ширины линии и т. д.). Этот метод использован, например, в установках автоматического контроля топологии печатных плат компании Orbot Instruments.

Метод анализа критериев корректности элементов рисунка, формируемых в процессе обучения, предполагает наличие режима предварительной самонастройки установки. При этом перед началом автоматического контроля установка анализирует изображение, предложенное в качестве бездефектного, после чего формирует набор признаков, которые в дальнейшем используются для анализа элементов рисунка. Формирование набора признаков может производиться как в автоматическом, так и в диалоговом режимах. В случае наличия ограничений на форму и размеры элементов топологии (например, при контроле фотошаблонов жидкокристаллических панелей индикации) этот метод может оказаться достаточно эффективным.

Методы сравнения с эталоном. Вторая группа методов предполагает, что топология реального объекта сравнивается с проектными данными, либо с топологией аналогичного объекта, принимаемого за эталон. Любое отличие от эталона считается дефектом. Эта группа методов позволяет обнаруживать все типы дефектов топологии, включая отсутствие (наличие лишних) конструктивных элементов, а также ошибки размеров и координат элементов.

Недостатком этой группы методов является необходимость точного совмещения реально-го и эталонного изображений, что влечет за собой необходимость создания прецизионной координатной системы, системы совмещения, а также систем динамической компенсации погрешностей совмещения. Кроме того, при работе данным методом принципиально невозможно контролировать объекты, допуски на положение элементов и размеры которых превышают требуемый размер минимального обнаруживаемого дефекта, без создания дополнительных систем распознавания контекста топологии и фильтрации дефектов. Поэтому данный метод используется, прежде всего, в микроэлектронике, где дефекты положения и размера играют такую же важную роль, как дефекты топологии.

В данную группу входят методы сравнения:

- с проектными данными;
- изображений мультиплицированных модулей;
- изображений мультиплицированных фрагментов;
- с проектными данными двух изображений одного рисунка, полученных разными оптическими способами [16];
- параметризованных моделей топологии [17].

Наиболее распространенным методом из этой группы является метод сравнения с проектными данными, который позволяет обнаруживать все 46 типов дефектов по международной классификации SEMI P23 [18], включая повторяющиеся дефекты. Метод сравнения рисунка с проектными данными (искусственным изображением) нашел наибольшее распространение в микроэлектронике в силу возможности контроля, как указывалось выше, дефектов всех типов. Этот метод реализован в установках KLA-201, KLA-331 [13], TeraStar [19], TeraScan [20] компании KLA-Tencor, в отечественных установках семейства ЭМ-6029Б, ЭМ-6329, ЭМ-6729.

Метод сравнения изображений мультиплицированных модулей используется для контроля топологии на кремниевых пластинах или на фотошаблонах, содержащих мультиплицированные фрагменты топологии. При этом сравниваются изображения трех и более чипов и по мажоритарному принципу определяются дефектные участки. Метод сравнения изображений мультиплицированных модулей в настоящее время используется в случаях, когда фор-

мирование эталонного искусственного изображения затруднено. Такая ситуация имеет место, например, на полупроводниковых пластинах, где необходимо контролировать оптически прозрачные слои, и возникающая задача разделения информации о топологии отдельных слоев крайне сложна. Этот метод, наряду с относительной простотой реализации, содержит существенный недостаток, заключающийся в невозможности контроля дефектов, связанных с отсутствием или наличием лишних конструктивных элементов. Кроме того, отсутствует возможность контроля повторяющихся дефектов, связанных с ошибками в первичных фотошаблонах, с загрязнением оптического канала мультимпликатора (установки переноса изображений), появлением привнесенных дефектов в рабочих фотошаблонах и т. п. Этот метод исторически был использован первым, когда реализация метода сравнения с проектными данными была технически неосуществима, и в настоящее время используется как дополнительный в установках контроля, так как на некоторых топологиях обеспечивает более высокую обнаружительную способность для определенных типов дефектов.

Метод сравнения изображений мультиплицированных фрагментов является специализированным, предназначенным в основном для контроля схем оперативных запоминающих устройств, и во многих случаях позволяет контролировать также повторяющиеся дефекты.

Метод сравнения с проектными данными двух различных изображений одного фрагмента топологии предполагает построение контролируемого рисунка в двух проекциях (например, в проходящем и отраженном свете). Этот метод позволяет идентифицировать элементы рисунка, имеющие отличную от основного рисунка физическую природу. Частично данный метод реализован, например, в установках компании KLA-Tencor – STARLight-SL300 [14]. В отечественных установках ЭМ-6729 этот метод, наряду с методом сравнения с проектными данными, используется для уточнения типа дефекта.

Метод сравнения параметризованных моделей топологии основан на вычислении параметров определенных участков топологии и дальнейшем сравнении этих параметров. При этом попиксельное сравнение реального и эталонного изображений заменяется сравнением параметров этих изображений. Метод наиболее

эффективен при создании частных алгоритмов контроля топологических структур определенного вида. Так, например, при контроле топологических слоев типа «контактные окна» этот метод позволяет получить субпиксельное разрешение на уровне 10 % от размера элемента разложения изображения (пиксела).

Алгоритм выбора метода автоматического контроля топологии планарных структур. Как следует из вышеприведенного анализа, при выборе метода автоматического контроля топологии нужно учитывать следующие факторы:

- множество типов дефектов, подлежащих автоматическому контролю;
- размер минимального обнаруживаемого дефекта для изолированных дефектов;
- размер минимального обнаруживаемого дефекта для прилегающих дефектов;
- допуск на положение, размеры и неровность края элементов топологии;
- возможную точность совмещения координатных систем сравниваемых изображений;
- возможный контраст изображения контролируемого оригинала в виде длины перехода темное/светлое в бинаризованной или полутонной модели;
- размер минимального элемента топологии.

Пусть M – множество основных типов дефектов; $S_{и}$, $S_{п}$, $S_{кр}$ – размеры минимальных обнаруживаемых дефектов для изолированных, прилегающих дефектов, дефектов размеров и координат элементов; ΔK – возможная точность совмещения координатных систем сравниваемых изображений; L – контраст изображения контролируемого оригинала в виде длины перехода темное/светлое в бинаризованной или полутонной модели; R – размер минимального элемента топологии. Тогда метод контроля можно представить в виде дискретной функции семи переменных

$$F = f(M, \Delta K, S_{и}, S_{п}, S_{кр}, L, R). \quad (1)$$

Переменные $S_{и}$, $S_{п}$, $S_{кр}$, ΔK , L , R задаются в микронах или нанометрах и используются для вычисления значений трех коэффициентов, на основании анализа значений которых принимается решение о выборе метода.

С точки зрения определения метода контроля, существенными являются только три типа дефектов: изолированные, прилегающие, а также дефекты координат и размеров. Обо-

значим их соответственно I , P , S . Определим переменную M , задаваемую булевым вектором, состоящим из трех двоичных переменных, каждая из которых соответствует необходимости контроля дефектов определенного типа.

Тогда область определения переменной M будет состоять из семи значений:

$$M(I, P, S) = \{[1, 0, 0], [1, 1, 0], [1, 0, 1], [1, 1, 1], [0, 1, 0], [0, 1, 1], [0, 0, 1]\}. \quad (2)$$

При $M = [1, 0, 0]$ нужно вычислить соотношение

$$K_1 = \frac{S_e}{R}. \quad (3)$$

Если $K_1 \leq 0,5$, то контроль можно производить как одним из методов сравнения с эталоном, так и одним из методов анализа топологии.

Для значения $M = [1, 1, 0]$ кроме K_1 нужно вычислить также значение

$$K_2 = \frac{S_i}{S_{e0} + \Delta K + L}. \quad (4)$$

Если $K_2 \geq 2$, то контроль возможно производить любым из методов в соответствии с анализом коэффициента K_1 . В противном случае – только методом сравнения с проектными данными с динамическим автосовмещением изображений. Для остальных значений вектора M необходимо вычислить значение K_3

$$K_3 = \frac{S_e}{S_{e0} + \Delta K + L}. \quad (5)$$

Если $K_3 \leq 1$, то наиболее эффективным будет метод анализа топологии. В противном случае – один из методов сравнения с эталоном.

Таким образом, используя реальные значения аргументов функции M , можно получить численную оценку параметров K_1 , K_2 , K_3 , анализ которых позволит сделать вывод о степени соответствия требуемых условий контроля тому или иному методу.

Структура алгоритма выбора метода контроля приведена на рис. 1. В общем случае выбор производится в два этапа. На первом этапе необходимо правильно выбрать группу методов автоматического контроля топологии. Выбор конкретного метода из группы производится на следующем этапе и, как правило, определяется уточнением постановки задачи и конструктивными особенностями.

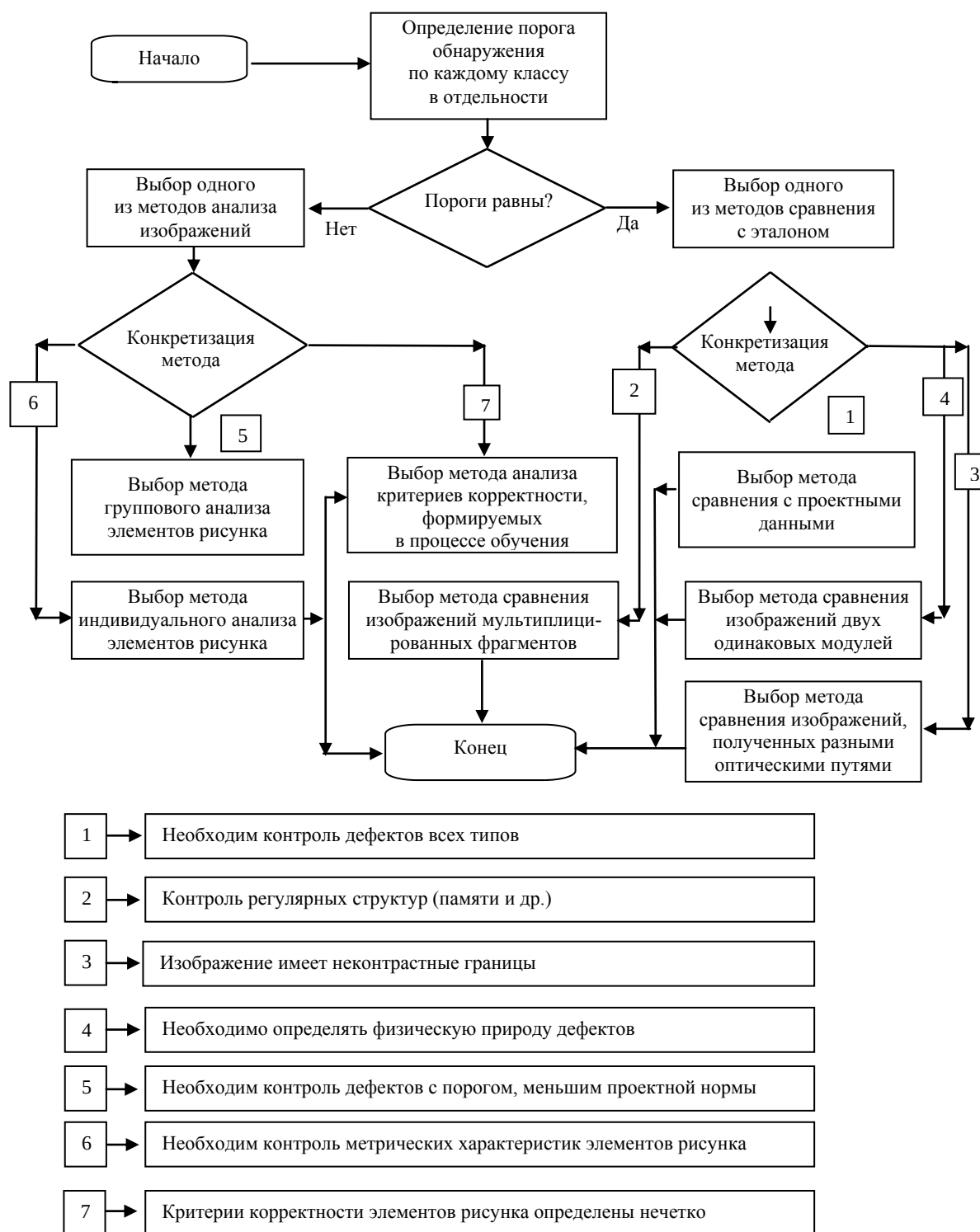


Рис. 1. Алгоритм выбора метода автоматического контроля топологии

В группе методов сравнения с эталоном наиболее точным и функционально полным является метод сравнения с проектными данными. Этот метод предпочтителен, если контролируемый объект выполнен с соблюдением жестких требований к месторасположению

элементов топологии на подложке и если отсутствуют ограничения по созданию системы совмещения реального и искусственного изображений. Данный метод нужно применять во всех случаях, когда могут быть выполнены следующие условия:

- проектные данные доступны для производителя продукции;
- имеется постпроцессор, позволяющий преобразовать проектные данные из формата системы проектирования в формат установки контроля;
- имеется возможность разделения топологии разных технологических слоев (только при контроле полупроводниковых пластин);
- имеется возможность построения систем совмещения и фотометрирования изображений, позволяющих достичь нужных значений коэффициентов K_2 и K_3 ;
- имеется возможность компенсации изменений линейных размеров, связанных с изменениями параметров микроклимата.

В случае наличия больших допусков на месторасположение элементов топологии, а также невозможности совмещения реального и эталонного изображений целесообразно использовать методы анализа топологии. При этом для однородных изображений (например, полупроводниковая пластина или фотосаблон с маскирующим покрытием без топологии) целесообразно использовать метод группового анализа, а для неоднородных – метод индивидуального анализа элементов рисунка.

ВЫВОД

На основании анализа и исследований существующего в нашей стране и за рубежом опыта создания оборудования для автоматического контроля топологии разработаны двухступенчатая классификация способов автоматического контроля топологии планарных структур и алгоритм, позволяющий выбрать способ автоматического контроля, соответствующий условиям контроля. Искомый метод автоматического контроля определяется путем вычисления соответствующего значения функции семи переменных F и выполнения алгоритма, представленного на рис. 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Results** from a new die-to-database reticle inspection platform / W. Broadbent [et al.] // SPIE. – 2007. – Vol. 6518. – P. 1–14.
2. **Avakaw, S.** A prospective modular platform of the mask pattern automatic inspection using the die-to-database method / S. Avakaw, A. Korneliuk, A. Tsitko // SPIE. – 2005. – Vol. 5853. – P. 965–976.
3. **Attenuated** phase-shift mask with high tolerance for 193-nm radiation damage / T. Yamazaki [et al.] // Bacus News. – 2012. – Vol. 28, Issue 3. – P. 1–10.
4. **Introduction** to the KLA-331 Next Generation Reticle Inspection System / M. Brandemuehl [et al.] // Bacus News. – 1992. – Vol. 8, Issue 9. – P. 1–8.
5. **Baliga, J.** Defect Detection on Patterned Wafers / J. Baliga // Semiconductor International. – 1997. – № 5. – P. 12–15.
6. **Kalk, F.** Pinhole Defect Detection and Printability Prediction / F. Kalk, A. Vacca, P. Radcliff // SPIE. – 1996. – Vol. 2884. – P. 104–112.
7. **Van Den Broeke, D.** Detectability of phatthe defects on phase shift masks using an Orbot RT 8000 / D. Van Den Broeke // BACUS. – 1997. – Vol. 13, Issue 3. – P. 1, 4–8.
8. **Shedding** Light on EUV Mask Inspection / K. Seki [et al.] // Bacus News. – 2012. – Vol. 28, Issue 9. – P. 1–11.
9. **Unpatterned** surface inspection for next-generation devices / H. Altendorfer [et al.] // Solid State Technology. – 1996. – № 8. – P. 264–266.
10. **Correcting** Image Placement Errors Using Registration Control Technology In The Photomask Periphery / A. Cohen [et al.] // Bacus News. – 2012. – Vol. 28, Issue 5. – P. 1–8.
11. **Guo, E.** Simulation Based Mask Defect Printability Verification and Disposition / E. Guo, I. Shi // SPIE. – 2011. – Vol. 8166. – P. D1–D8.
12. **Badger, K. D.** Illuminating EUVL Mask Defect Printability / K. D. Badger, Z. J. Qi, E. Gallagher // SPIE. – 2012. – Vol. 8522. – P. 11–15.
13. **Introduction** to the KLA 331 Next Generation Reticle Inspection System / M. Brandemuehl [et al.] // Bacus News. – 1992. – Vol. 8, Issue 9. – P. 1, 4–8.
14. **The Use** of KLA-Tencor STARlight SL300 for In-Process Contamination Inspection to Control Reticle Defect Densities / D. Dutton [et al.] // SPIE. – 1998. – Vol. 3546. – P. 132–138.
15. **Avakaw, S. M.** High productivity object-oriented defect detection algorithms for the new modular die-to-database reticle inspection platform / S. M. Avakaw // SPIE. – 2005. – Vol. 5835. – P. 290–299.
16. **Способ** контроля дефектности первичных шаблонов: пат. 8893 Респ. Беларусь, МПК 7 G 06K 9/00 / А. И. Корнелюк, С. М. Аваков; заявитель Науч.-производ. республ. унит. предпр. «КБТЭМ-ОМО». – № а 20040821; заявл. 31.08.2004; опубл. 28.02.2007 // Афіц. бюл. Вынаходствы. Карысныя мадэлі. Прамысловыя узоры / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасти. – 2007. – № 1. – С. 127.
17. **Способ** контроля дефектности первичных шаблонов: пат. 9175 Респ. Беларусь, МПК 7 G 06K 9/00 А. И. Корнелюк, С. М. Аваков; заявитель Науч.-производ. республ. унит. предпр. «КБТЭМ-ОМО» № а 20040985; заявл. 26.10.2004; опубл. 30.04.2007 // Афіц. бюл. Вынаходствы. Карысныя мадэлі. Прамысловыя узоры / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасти. – 2007. – № 2. – С. 156–157.
18. **SEMI** 23-93 Guidelines for Programmed Defect Masks and Benchmark Procedures for Sensitivity Analysis of Mask Defect Inspection Systems. – SEMI. – 1993, 1995.
19. **Extending** TeraStar reticle inspection capability to the 90 nm node through layer specific algorithms / M. Rudzinsky [et al.] // VDE/VDI Gesellschaft Mikroelektronik GMM Fachbericht. – 2003. – № 39. – P. 159–167.
20. **Optimized** inspection of advanced reticles on the TeraScan reticle inspection tool / A. Dayal [et al.] // SPIE. – 2005. – № 5992. – P. 45–1–45–11.

Поступила 25.03.2013