

Автофокусировка в установках автоматизированного контроля дефектов топологического рисунка фотошаблонов и полупроводниковых пластин

СЕРГЕЙ АВАКОВ, АНДРЕЙ БЕЗЛЮДОВ, НИКОЛАЙ ГАЙКОВ, ВЛАДИМИР ЛАНИН, ВИКТОР ОГЕР, ДМИТРИЙ ТИТКО, ГЕОРГИЙ ТРАПАШКО, tga@kbtem-omo.by

Для повышения точности автоматизированного контроля дефектов топологического рисунка фотошаблонов и полупроводниковых пластин предложена система автофокусировки, обеспечивающая удержание поверхности объекта в зоне резкости объектива при последовательном сканировании топологии.

Автоматический контроль топологического рисунка структуры полупроводникового прибора предполагает использование в контрольном оборудовании функции автоматической фокусировки, которая обеспечивает удержание поверхности объекта контроля в зоне резкости объектива при последовательном сканировании всей поверхности образца. Актуальность автоматической фокусировки связана с тем, что без нее невозможно в принципе осуществить автоматический контроль изделий, поскольку определяющую роль в процессе контроля играет непрерывное поддержание резкого изображения. При этом могут достигаться различные цели контроля: поиск привнесенных дефектов, регистрация искажений топологического рисун-

ка или контроль размеров элементов структур и т.п. Система автоматической фокусировки позволяет определить такое положение контролируемого образца относительно рабочего объектива, в котором объектив формирует изображение этого образца с распределением световой энергии, наименее отличающимся от ее распределения в образце [1], что имеет особую важность для достоверной регистрации топологического рисунка структуры полупроводникового прибора.

Концепция построения системы автофокусировки установок предполагает наличие четырех основных частей, совместно образующих контур отрицательной обратной связи: оптической, электронной, программной и механической. Оптическая часть реализована

в виде датчика фокусировки и решает задачу формирования сигнала, величина и знак которого характеризует положение поверхности контролируемого образца относительно плоскости изображений объектива. Электронная часть представляет собой контроллер, принимающий сигналы датчика фокусировки и формирующий управляющие токи для двигателя фокусирующего механизма. Программная часть реализует алгоритм автоматического определения фокусного расстояния от объектива до объекта и непрерывно поддерживает фокусировку при поиске дефектов. Алгоритм подробно описан далее в данной статье. Механическая часть представляет собой фокусирующий механизм, который характеризуется скоростью и точностью вертикального позиционирования [2]. При этом в зависимости от решаемой задачи позиционироваться может как контролируемый образец, так и рабочий объектив.

Реализация датчика фокусировки в одном случае может представлять собой отдельный оптико-механический узел, выходной сигнал которого зависит от положения поверхности образца относительно датчика и формируется его собственной оптико-электронной схемой. Вот почему он располагается над образцом параллельно рабочему объективу. Конструктивно датчик выполнен в виде насадки на объектив. Эта особенность компоновки часто не позволяет использовать ее для работы с комплектом объективов, сменяемых на рабочей позиции для реализации различных режимов регистрации изображений или наблюдений исследуемой поверхности образцов. Такое противоречие разрешимо, если рабочий объектив сделать элементом

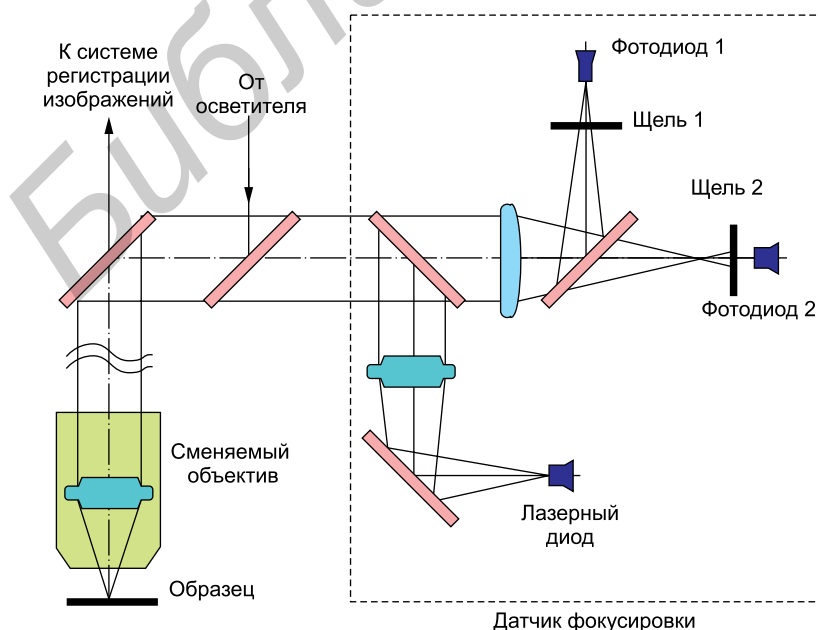


Рис. 1. Оптическая схема датчика фокусировки

оптико-электронной схемы датчика фокусировки. Для этого случая оптическая схема датчика фокусировки приведена на рисунке 1.

Свет от лазерного диода, проходя через систему полупрозрачных зеркал и объектив, фокусируется на поверхности образца (фотошаблоне или полупроводниковой пластине) и затем, отражаясь, проходит обратно через объектив, систему зеркал, разделяется на два канала, содержащих щелевую диафрагму и фотодиод, и вновь фокусируется на оптических осях в обоих каналах. При изменении вертикального положения поверхности образца соответственно ей смещается положение точек фокусировки в каналах датчика. Причем максимальный уровень света, попадающий на фотодиод, соответствует положению, когда свет фокусируется в центре щелевой диафрагмы. Поскольку щели расположены на различном расстоянии от фокусирующей линзы датчика, то условие баланса световой энергии, принимаемой фотодиодами, соблюдается только тогда, когда исследуемая поверхность совпадает с плоскостью резкого изображения объектива. Смена объектива на рабочей позиции означает, что условие баланса может быть нарушено из-за незначительного изменения парфокального отрезка у другого объектива. Поскольку степень влияния изменения этого отрезка на баланс световых сигналов можно определить заранее, то со сменой объектива незначительно изменяется и положение вдоль оптической оси фокусирующей линзы датчика с целью сохранения условия баланса.

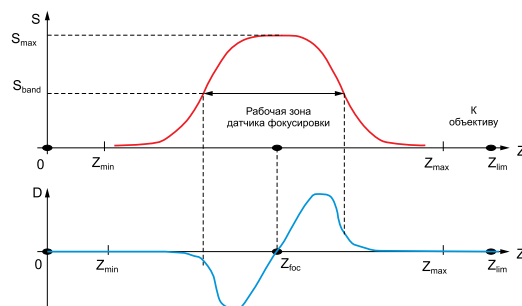
Электронное устройство сопряжения датчика автофокусировки формирует два сигнала: суммарный сигнал фотодиодов (S) и разностный (D), которые изображены на рисунке 2.

Превышение суммарным сигналом заданного порогового уровня S_{band} характеризует величину рабочей зоны датчика, а нулевое значение разностного сигнала в зоне указывает на положение плоскости резкого изображения объектива.

Главными элементами контроллера системы автофокусировки (см. рис. 3) являются устройство сопряжения датчика автофокусировки и микрошаговый двухфазный контроллер привода фокусировки MSDC-256.

Как видно на рисунке 3, четыре сигнала с фотоприемников – суммарный первый (sum1), суммарный второй (sum2), дифференциальный первый (diff1) и дифференциальный второй (diff2) – поступают в устройство сопряжения датчика автофокусировки. Это устройство обеспечивает питание

Рис. 2. Зависимость сигналов S и D от положения Z поверхности образца



полупроводникового лазера, управление модуляцией лазера, а также усиление сигналов с фотоприемников двумя каскадами усиления. В конечном итоге устройство сопряжения формирует на выходе три сигнала: дифференциальный FD , суммарный FS и цифровой сигнал DZ . Причем дифференциальный и суммарный сигналы приводятся к диапазону 0–2,5 В. Знак дифференциального сигнала определяется цифровым сигналом DZ (0 означает, что $D \geq 0$, 1 – $D < 0$). Это необходимо, поскольку АЦП микроконтроллера может работать только с однополярным сигналом.

Затем три сигнала (FD , FS , DZ) поступают в контроллер привода фокусировки, главным элементом которого является однокристалльный микроконтроллер Silicon Laboratories C8051F005 с высокоскоростным вычислительным ядром 8051. Микроконтроллер имеет в своем составе 12-разрядный АЦП и расположенный на его входе управляемый 8-канальный аналоговый коммутатор. Таким образом, с помощью данного микроконтроллера можно оцифровать до восьми аналоговых сигналов в режиме разделения по времени. Надвоя таких входа подаются сигналы FD и FS . Сигнал DZ подается на цифровой вход микроконтроллера. Полученные сигналы FD и FS в цифровой форме подвергаются математической обработке в вычислительном ядре микроконтроллера. В результате обработки формируются управляющие сигналы для двигателя привода фокусировки. Управляющие сигналы поступают через 2-канальный ЦАП в драйвер (усилитель по току) IL9001, который формирует токи в фазах шагового двигателя, в результате объект перемещается по фокусу (вверх или вниз).

Таким образом, в зависимости от сигналов FD , FS , DZ в соответствии с алгоритмом, реализованным в микроконтроллере, осуществляется непрерывное управление приводом фокусировки и обеспечивается поддержание фокуса.

Программа автофокусировки реализует алгоритм автоматического

определения фокусного расстояния от объектива до объекта и непрерывно поддерживает фокусировку при поиске дефектов. Стадии выполнения алгоритма:

1. Установка заданного объектива в рабочую позицию приводом револьверной головки под управлением контроллера MSCD-64D (контроллер микрошаговый двухфазный – ось 1).
2. Перемещение корректирующей линзы (см. рис. 1) в рабочую позицию, координата которой определяется установленным объективом. Управление обработкой перемещения по оси 2 выполняет контроллер MSCD-64D.
3. Привод фокусировки перемещает координатный стол вместе с объектом в координату Z_{min} (см. рис. 2).
4. Привод фокусировки перемещает координатный стол вместе с объектом из координаты Z_{min} в координату Z_{max} . Во время движения контроллер привода фокусировки с частотой 1000 раз в секунду считывает сигнал FS с датчика автофокусировки. В случае если текущее считанное значение FS больше предыдущего, текущие значения координаты Z и амплитуды сигнала FS сохраняются в ячейках памяти соответственно Z_{max} и S_{max} . После окончания перемещения в координату Z_{max} в ячейке Z_{max} будет находиться координата, в которой сигнал FS был максимальным.
5. Управляющая ЭВМ считывает из контроллера привода фокусировки координату Z_{max} и дает команду контроллеру привода фокусировки переместить координатный стол с объектом в эту координату.
6. После окончания перемещения управляющая ЭВМ включает режим автофокусировки, загружая команду в контроллер привода фокусировки. В режим автофокусировки контроллер системы управления фокусировкой осуществляет управление приводом фокусировки с частотой 1 кГц для непрерывного поддержания фокусировки.

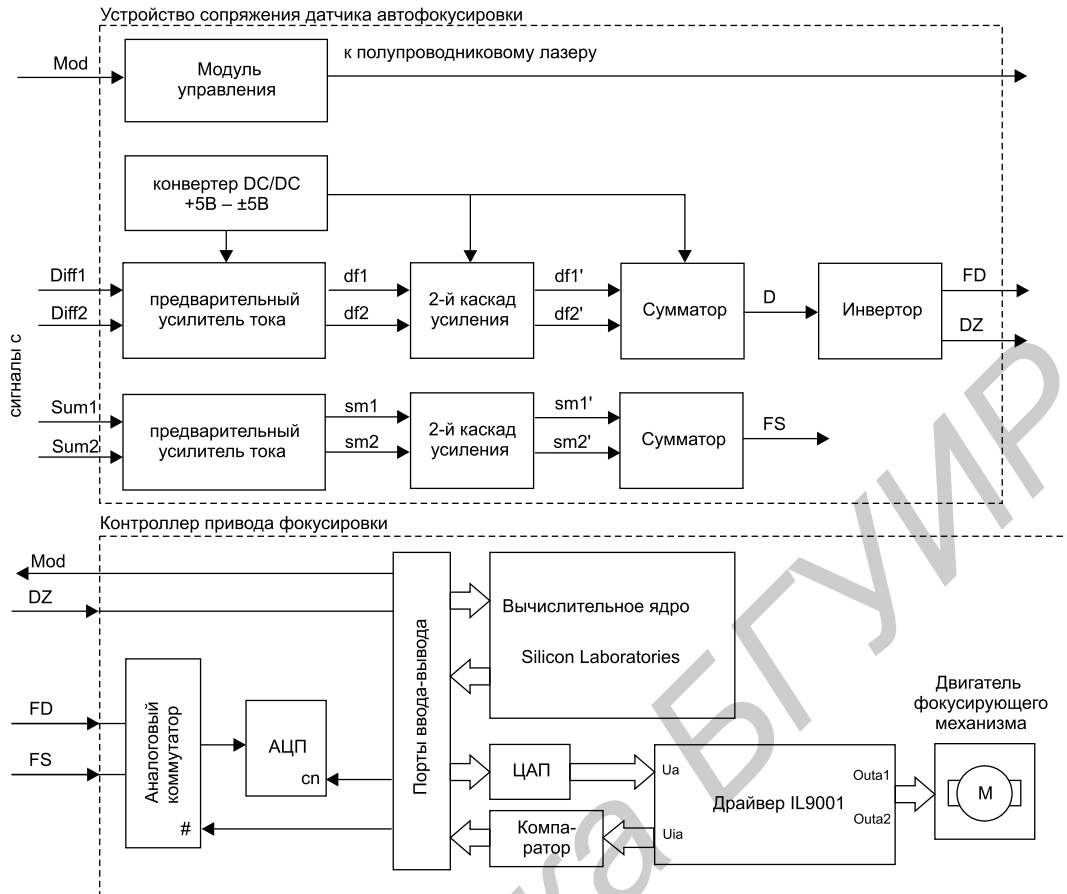


Рис. 3. Функциональная схема электронной части системы автофокусировки

7. Перед сменой объектива или перед загрузкой (выгрузкой) объекта управляющая ЭВМ выключает режим автофокусировки.

Для регулирования в режиме автофокусировки используется пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, алгоритм работы которого описывается следующей формулой:

$$\Delta Z_{PI(i)} = K_p \left(K_b \cdot \frac{D_i}{S_i} \right) + K_i \sum_{j=1-n}^i \left(K_b \cdot \frac{D_j}{S_j} \right);$$

где $\Delta Z_{PI(i)}$ – приращение координаты на привод фокусировки;

K_b – общий масштабирующий коэффициент;

D_i – значение дифференциального сигнала D с датчика автофокусировки в i -й момент времени;

S_i – значение суммарного сигнала FS с датчика автофокусировки в i -й момент времени;

K_p – коэффициент пропорциональной составляющей;

K_i – коэффициент интегральной составляющей;

n – глубина интегральной составляющей, число измерений суммарного сигнала, предшествующих моменту расчета.

Коэффициенты K_b , K_p , K_i определяют экспериментально при наладке для каждого объектива отдельно. Следует отметить, что для датчика автофокусировки выполняется следующее условие:

$$-1.0 \leq \frac{D_i}{S_i} \leq 1.0.$$

Поскольку вычислительное ядро микроконтроллера 8-разрядное, вышеприведенная формула работает в целых числах, то есть вначале коэффициент K_b умножается на D_i , а затем полученное произведение целочисленно делится на S_i , поэтому вынос коэффициента K_b из-под знака суммы не представляется возможным. Также важно отметить, что если текущий сигнал S_i упал ниже критического уровня S_{band} , то это необходимо, чтобы исключить регулирование в случае форс-мажорной ситуации (например, объект извлекли из-под объектива или на пути луча лазера возникла преграда – в этих случаях сигнал S_i будет очень близок к нулю).

На рисунке 4 приведен сигнал D_i при выключенной и включенной системе автофокусировки. При обычных настройках системы автофокусировки наблюдается большое перерегулирование, и система фокусировки имеет колебательный характер (см. рис. 4 а). При уточненных настройках системы автофокусировки в результате отладки переходный

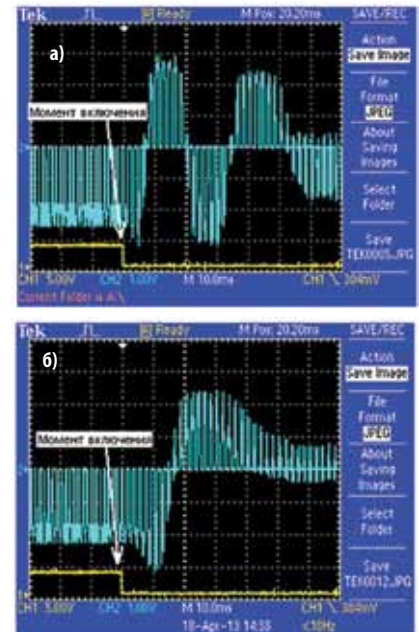


Рис. 4. Сигнал D_i при выключенной и включенной системе автофокусировки

процесс имеет значительно меньшее время успокоения и только один период перерегулирования (см. рис. 4 б).

Внешний вид датчика автофокусировки и контроллер привода фокусировки приведены на рисунках 5 и 6 соответственно.

Эти технические решения используются при оснащении системами

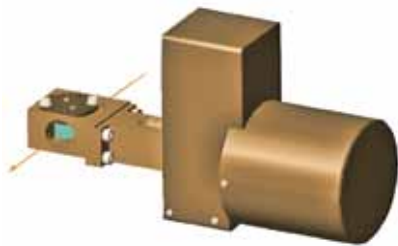


Рис. 5. Внешний вид датчика автофокусировки



Рис. 6. Контроллер привода фокусировки

автофокусировки специализированного оптико-механического контрольно-измерительного оборудования (см. рис. 7) для промышленного производства изделий микроэлектроники [3, 4].

Установка автоматизированного контроля микроразмеров на полупроводниковых пластинах ЭМ-6239, оснащенная автоматической загрузкой пластин, и установка контроля критических размеров ЭМ-6339 предназначены для контроля размеров элементов топологического рисунка на фотошаблонах в технологическом процессе производства МЭМС и акустоэлектронных устройств. Упрощенная модель из этой серии представлена установкой автоматизированного контроля дефектности ЭМ-6015 М, которая предназначена для обнаружения дефектов и загрязнений на поверхности полупроводниковых пластин и фотошаблонов, в том числе защищенных с двух сторон пелликлами. Контроль проводится с использованием режимов освещения

Номинальный размер элемента	0,7 мкм			
	0,8 мкм			
		Светлое поле	Светлое и темное поле	Темное поле
Режимы освещения отраженного света видимого диапазона				

Рис. 8. Применение различных режимов освещения при наблюдении элементов с размерами, близкими к пределу разрешения объектива

светлое и темное поле отраженного и проходящего света и их различных комбинаций. Эффект от применения комбинации различных режимов освещения при наблюдении групповых тестовых элементов, сформированных в виде буквы L в слое нитрида на окиси кремния и имеющих топологические размеры, сопоставимые с пределом разрешения объектива, представлен на рисунке 8.

На рисунке 8 видно, что добавление к освещению светлого поля некоторой доли темнопольного освещения повышает детализацию изображения, полученного с помощью объектива с 20-кратным увеличением, апертурой 0,38 и предельным разрешением 0,8 мкм. Поэтому использование комбинаций режимов освещения создает условия для улучшения возможностей визуального обнаружения дефектов минимального размера. В связи с тем, что предложенное техническое решение системы автофокусировки в отличие от систем, фокусирующих по изображению, основано на использовании собственного источника света и никоим образом не связано с системой регистрации изображений, изменение режимов освещения не влияет на положение фокусировки образца. Кроме этого, использованный принцип работы датчика позволяет поддерживать фокусировку поверхности, которая не имеет рисунка, или на быстро перемещающейся

поверхности с рисунком, когда обработка изображения невозможна из-за размазывания картинки. Последнее особенно важно при сканировании образца во время просмотра или в режиме автоматического обхода и регистрации изображений областей интереса (ROI), когда возможна потеря изображения, если поверхность образца вышла из глубины резко изображаемого пространства объектива (DOF). Описанный датчик фокусировки имеет рабочую зону, на два порядка превышающую глубину резко изображения объектива, что исключает потерю контроля за положением поверхности исследуемого образца. —

ЛИТЕРАТУРА

1. Шульман М. Я. Автоматическая фокусировка оптических систем. СПб: Машиностроение, 1990.
2. Введенский С. Оптический микроскоп с некогерентным освещением//Электроника: наука, технология, бизнес. 2005. № 1.
3. Аваков С., Пушкин Л., Русецкий В., Трапашко Г., Юдицкий В. Лазерное оборудование для изготовления фотошаблонов//Электроника: наука, технология, бизнес. 2010. № 3.
4. Аваков С. и др. Специализированное оптико-механическое и контрольно-измерительное оборудование для промышленного производства изделий микросистемотехники//Нано- и микросистемная техника. 2012. № 8.



Рис. 7. Контрольно-измерительное оборудование для контроля изделий микроэлектроники, оснащенное системами автоматической фокусировки