

УДК 621.3.049.77.002.5

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ЛУЧШЕГО ИЗОБРАЖЕНИЯ И МАСШТАБА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРОЕКЦИОННОГО ОБЪЕКТИВА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

А.С. АГЕЙЧЕНКО, В.Е. МАТЮШКОВ

Конструкторское бюро точного электронного машиностроения
Партизанский пр., 2, Минск, 220033, Беларусь

Поступила в редакцию 14 февраля 2011

Рассмотрены факторы, оказывающие влияние на положение плоскости лучшего изображения проекционных объективов в процессе экспонирования. Описано устройство для определения плоскости лучшего изображения и масштаба изображения проекционного объектива в реальном времени.

Ключевые слова: фотолитография, проекционный объектив, световая нагрузка, плоскость лучшего изображения

Введение

Фотолитография играет критическую роль в технологии изготовления микросхем.

Качество переноса изображения напрямую зависит от параметров объектива проекционной экспонирующей системы. При изменении условий окружающей среды, в которой находится проекционный объектив, изменяются его оптические параметры. На положение плоскости лучшего (резкого) изображения и на масштаб проекционного объектива оказывают влияние также и ультрафиолетовое (УФ) излучение, проходящее через оптическую систему в процессе экспонирования и частично поглощаемое элементами объектива.

Новому устройству для определения плоскости лучшего изображения и масштаба изображения проекционного объектива в реальном времени посвящена данная статья.

История вопроса

Качество переноса изображения напрямую зависит от параметров объектива проекционной экспонирующей системы. При изменении условий окружающей среды, в которой находится проекционный объектив, изменяются его оптические параметры. Так, в зависимости от температуры корпуса объектива и оптических элементов, а также температуры, давления и влажности воздуха на всем оптическом ходе лучей, плоскость лучшего или резкого изображения объектива (ПЛИ) изменяет свое положение в некотором диапазоне. Изменяется также масштаб переноса изображения (увеличение) объектива.

Для уменьшения воздействия факторов окружающей среды прецизионные установки фотолитографии помещают в специальные камеры микроклимата, в которых поддерживается достаточно стабильная температура и влажность воздуха. Изменения атмосферного давления обычно происходят достаточно медленно. Периодически производится измерение и учет текущих оптических параметров проекционного объектива, в том числе масштаба и положения ПЛИ.

На положение плоскости лучшего изображения и на масштаб проекционного объектива оказывают влияние не только параметры внешней среды, но также и УФ-излучение, проходящее через оптическую систему в процессе экспонирования. При этом часть энергии УФ экспо-

нирующего света поглощается оптическими компонентами объектива (оптическим материалом линз, просветляющими или отражающими покрытиями) и воздухом. Помимо нагрева оптических компонентов и элементов конструкции объектива экспонирующим излучением, происходят изменения в физико-химическом составе воздуха в объективе. Изменяется не только температура и влажность воздуха, но также происходит фотохимическая реакция замещения кислорода воздуха на озон. В результате изменяется показатель преломления воздуха в объективе и плоскость резкого изображения смещается. Дрейф плоскости резкого изображения приводит к ухудшению качества переноса изображения. Особенно это критично для широкопольных экспонирующих систем с зеркально-линзовыми объективами, у которых, как правило, длина хода лучей по воздушным промежуткам намного превышает ход лучей в стекле. В некоторых случаях уход плоскости резкого изображения в несколько раз превышает глубину резкости объектива. Поэтому простая стабилизация параметров внешней среды становится не достаточной мерой. Дрейф плоскости резкого изображения из-за поглощения экспонирующего излучения объективом происходит непосредственно в процессе экспонирования. Причем световая нагрузка на объектив носит не равномерный во времени характер, так как в рабочем цикле всегда присутствует время на загрузку новой пластины и совмещение, в течение которого объектив релаксирует к исходному состоянию.

Световая нагрузка на объектив, приводящая к смещению плоскости резкого изображения, особенно негативно сказывается при работе с минимальными элементами топологии, имеющими размер, близкий к пределу разрешения объектива. А также при работе с фоторезистами, имеющими низкую чувствительность и большую толщину, когда требуется большая доза экспонирования и, соответственно, большая световая нагрузка на объектив. Именно такие резисты применяются в технологии передовой упаковки микросхем методом перевернутого чипа.

Возможны случаи, когда в процессе экспонирования одной пластины или даже каждого отдельного кадра на одной пластине необходимо корректировать положение плоскости пластины из-за дрейфа плоскости резкого изображения объектива, вызванного поглощением УФ-излучения в объективе.

Обычно плоскость резкого изображения, масштаб и дисторсия объектива измеряются специальным фотоприемником, который расположен на столе пластин и при движении стола анализирует изображение от специальных знаков на ретикле. После чего производится компенсация изменений параметров объектива путем изменения давления воздуха в объективе или перемещением некоторых компонентов объектива. Известны варианты объективов, где предлагается уменьшить влияние экспонирующего света на параметры объектива заполнением воздушных промежутков в объективе инертным газом, не имеющим полосы поглощения для экспонирующего света [1, 2].

Описанные способы не позволяют полностью устранить влияние экспонирующего света на параметры объектива и весьма дороги в реализации и эксплуатации установки. Более того, известные способы определения плоскости резкого изображения не позволяют проводить измерения положения плоскости резкого изображения в момент экспонирования или совмещения. Поэтому измерение и учет дрейфа плоскости резкого изображения проводится периодически [3], что, с одной стороны, постепенно приводит к ухудшению качества переноса изображения, с другой стороны вынужденная остановка рабочего цикла для аттестации текущих параметров проекционного объектива приводит к снижению общей производительности системы экспонирования.

Измерение плоскости резкого изображения часто производится или пробными отсчетами тестовой структуры ретикла на покрытую фоточувствительным слоем пластину при различных положениях пластины вдоль оси объектива, или при помощи специального фотоприемника со щелевой диафрагмой, установленного на столе пластин, который измеряет распределение интенсивности света (фотометрирование) в изображении специального знака ретикла [4–6]. Изображение знака ретикла в экспонирующем свете строится проекционным объективом в плоскость пластины. Фотометрирование изображения производится при последовательном смещении вдоль оси объектива либо плоскости ретикла (относительно плоскости предметов), либо при последовательном смещении вдоль оси объектива стола пластин и плоскости щелевой диафрагмы фотоприемника (относительно плоскости изображения). Анализ распреде-

ления интенсивности света в изображении в различных плоскостях позволяет определить плоскость резкого изображения объектива. К недостатку таких устройств можно отнести то обстоятельство, что для измерения ПЛИ необходимо прервать рабочий цикл устройства экспонирования, что приводит к снижению производительности проекционной экспонирующей системы.

Устройство для определения плоскости резкого изображения и масштаба проекционного объектива в реальном времени

Для решения проблемы измерения плоскости лучшего изображения и масштаба проекционного объектива в реальном времени был разработан (и запатентован) оригинальный фотоэлектрический датчик измерения масштаба проекционного объектива и положения плоскости резкого изображения [7–9]. Этот датчик устанавливается на проекционном объективе так, что поле датчика находится вне рабочего поля экспонирующей системы. Для его работы используется излучение экспонирующей длины волны. Датчик содержит плоскую маску с прозрачными полосками постоянной ширины и с дополнительной меткой в центре, оптически связанную с приемником ее изображения и установленную относительно него с возможностью построения изображения одного конца каждой полоски выше, а другой – ниже плоскости резкого изображения объектива. На рис. 1 изображена общая схема фотоэлектрического датчика определения плоскости резкого изображения.

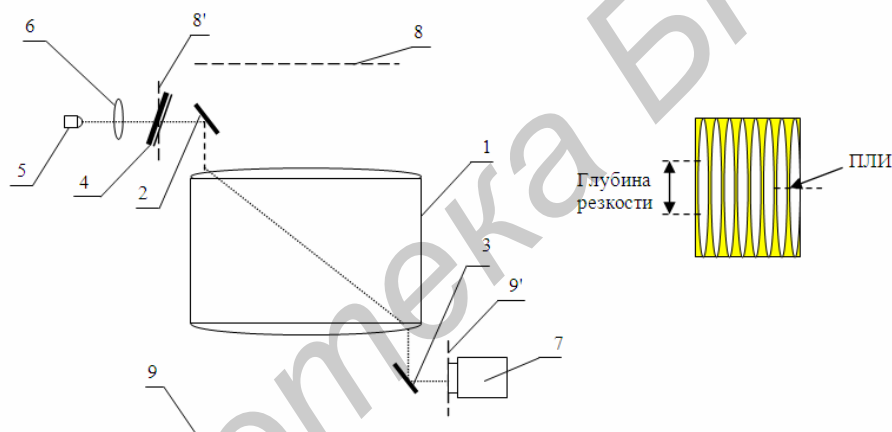


Рис. 1. Схема фотоэлектрического датчика определения плоскости резкого изображения

Все элементы датчика расположены на корпусе проекционного объектива 1.

Датчик определения плоскости резкого изображения содержит поворотные зеркала 2 и 3, предметную маску 4, осветитель, состоящий из светодиода 5 и линзы 6, приемную ТВ-камеру 7. При помощи зеркала 2 небольшой участок плоскости предметов 8 (плоскость топологии на ретикле) поворачивается относительно оси объектива 1 примерно на 90 градусов в повернутую сопряженную предметную плоскость 8'. При помощи зеркала 3 участок плоскости изображения 9 (поверхность пластины) поворачивается относительно оси объектива 1 также на 90 градусов в повернутую сопряженную плоскость изображения 9'.

Линзы проекционного объектива (и оправы, в которых линзы крепятся) по технологии изготовления обычно имеют форму круга. Поэтому и полное поле проекционного объектива также имеет форму круга.

Топология рисунка на ретикле и рабочее поле устройства экспонирования обычно имеют форму прямоугольника, вписанного в круг поля объектива. Осветительная система освещает также только рабочее поле в виде прямоугольника. Поэтому в любом проекционном объективе существуют зоны, которые практически не используются для передачи изображения с ретикла на пластину. Рабочее поле датчика измерения масштаба проекционного объектива и положения плоскости резкого изображения со стороны предметов и со стороны изображения расположены именно в такой, не используемой зоне объектива.

В сопряженной плоскости предметов 8' находится предметная маска 4, которая равномерно освещается светом рабочей (экспонирующей) длины волны экспонирующей системы от светодиода 5 при помощи линзы 6. Для освещения предметной маски кроме светодиода можно также использовать часть света от источника экспонирующего излучения. Благодаря тому, что свет, используемый для работы датчика, не попадает на пластину со светочувствительным слоем, в датчике можно использовать свет именно с длиной волны экспонирования, которая является лучшей длиной волны относительно хроматической аберрации проекционного объектива 1. Проекционный объектив строит изображение маски датчика в сопряженную плоскость изображений 9', где находится приемная часть ТВ-камеры 7.

Изображение маски датчика строится проекционным объективом в плоскость его приемника, причем маска датчика (или плоскость приемника) расположена под углом к плоскости предметов (или плоскости изображения объектива) соответственно.

Маска датчика представляет собой стеклянную пластину, покрытую светоотражающим (или поглощающим) материалом. Например, с напылением слоя алюминия или хрома, в котором вытравлены участки (окна) в виде узких полос. Ширина полос топологии предметной маски выбирается близкой к разрешающей способности проекционного объектива с учетом увеличения объектива и размера пикселя приемной ТВ-камеры.

Предметная маска 4 установлена под углом к сопряженной плоскости предметов 8'. Пропускающие свет полосы маски ориентированы по отношению к углу наклона маски так, что один конец каждой полосы всегда находится дальше от объектива 1, чем сопряженная плоскость предметов 8' (выше плоскости предметов 8). Второй конец каждой полосы всегда находится ближе к объективу 1, чем сопряженная плоскость предметов 8' (ниже плоскости предметов 8). Благодаря этому в поле зрения приемной ТВ-камеры всегда присутствует изображение участка маски 4, который был расположен точно в предметной плоскости и его изображение находится в плоскости резкого изображения, а также изображение концов маски, которые находятся выше и ниже предметной плоскости.

В поле зрения ТВ-камеры изображение по всей длине полосы неизбежно исказится: изображение краев маски, которые находятся выше или ниже предметной плоскости (и глубины резкости объектива), будет размытым и расширенным (рис. 1). В средней части, в плоскости лучшего изображения, изображение полос маски 4 будет резким. В этом месте ширина полосы будет минимальна, и соответствовать ширине полосы на маске, умноженной на оптическое увеличение проекционного объектива.

Для определения положения плоскости резкого изображения по информации с ТВ-камеры можно использовать любой из известных алгоритмов обработки изображения: соответствие идеальному образу, измерение контраста или угла наклона края, измерение ширины на половине высоты и т.п. Были проведены сравнительные эксперименты по выбору метода обработки видеоизображения датчика определения плоскости лучшего изображения. Распределение интенсивности света в изображении, полученном с матрицы пикселей ТВ-камеры, является дискретной функцией. В этом случае, для вычисления положения перетяжки в изображении полос маски датчика в координатной сетке ТВ-камеры удобно воспользоваться методом быстрого преобразования Фурье.

В быстром преобразовании Фурье время вычислений экономится за счет уменьшения количества умножений, необходимых для анализа изображения. В процессе обработки изображения каждой строки (столбца) вычисляется амплитуда пространственной частоты первой гармоники. По мере выхода из глубины фокуса амплитуда пространственной частоты первой гармоники уменьшается. Таким образом, в изображении полос маски датчика определяется номер строки (столбца), в которой амплитуда пространственной частоты первой гармоники максимальна. Положение центра тяжести распределения амплитуд первой гармоники (с субпиксельной аппроксимацией) соответствует текущему положению ПЛИ проекционного объектива.

Если в процессе работы системы экспонирования положение плоскости резкого изображения объектива начнет смещаться вдоль оптической оси, то зона резкого изображения полос предметной маски 4 будет также пропорционально смещаться в поле зрения ТВ-приемника. Величина этого смещения будет равна:

$A_{CM} = \Phi / \sin \alpha$ для случая наклона приемника,

$A_{CM} = \Phi / \operatorname{tg} \alpha$ для случая наклона маски,

где A_{CM} – величина смещения, измеренная ТВ-камерой датчика; Φ – реальное смещение плоскости лучшего изображения вдоль оси объектива; α – угол наклона предметной маски 4 относительно сопряженной плоскости предметов 8' (или угол наклона плоскости приемника 7 относительно сопряженной плоскости изображения 9').

Ввиду того, что измерить угол наклона маски или приемника с высокой точностью трудно, предварительно производится калибровка показаний датчика при помощи измерения плоскости резкого изображения объектива датчиком со щелевой диафрагмой.

Рассмотрим принцип работы датчика для измерения масштаба проекционного объектива. Изображение любой точки предметной плоскости, которая не находится точно на оси объектива, при изменении масштаба объектива смещается в плоскости изображения на некоторую величину относительно оси объектива. Величина смещения изображения конкретной точки предметной плоскости пропорциональна расстоянию от этой точки до оси объектива.

Система определения масштаба изображения проекционного объектива в реальном времени

Для измерения масштаба объектива в центре маски датчика изготовлен дополнительный знак, например в виде креста. Изображение этого знака при изменении масштаба проекционного объектива будет смещаться в поле зрения приемной ТВ-камеры. На рис. 2 показано изображение маски с приемной ТВ-камеры датчика для измерения плоскости лучшего изображения и масштаба объектива в реальном времени.



Рис. 2. Изображение маски датчика для измерения ПЛИ и масштаба изображения объектива

Положение изображения креста маски в плоскости ТВ-приемника при различных масштабах объектива предварительно калибруется путем измерения масштаба изображения знаков тестового ретикла при помощи координатного стола пластин и фотоприемника со щелевой диафрагмой [7].

Фотоэлектрический датчик определения плоскости лучшего изображения и масштаба проекционного объектива применен в широкоформатных степперах ЭМ-5434М, а его модификации [8, 9] в широкоформатном степпере ЭМ-5634. В этом степпере вокруг рабочего поля проекционного объектива расположено три фотоэлектрических датчика определения плоскости резкого изображения, которые обеспечивают не только правильную фокусировку каждого кадра, но также выравнивание (фокусирование по трем точкам).

Выводы

Поглощение части экспонирующего света элементами объектива приводит к смещению плоскости резкого изображения и масштаба проекционного объектива. Особенно негативно на

качестве переноса изображения это сказывается в технологии передовой упаковки микросхем методом перевернутого чипа: при работе с фоторезистами, имеющими низкую чувствительность и большую толщину, когда требуется большая доза экспонирования и, соответственно, большая световая нагрузка на объектив.

Для решения проблемы измерения плоскости лучшего изображения и масштаба проекционного объектива в реальном времени был разработан (и запатентован) оригинальный фотоэлектрический датчик измерения масштаба проекционного объектива и положения плоскости резкого изображения. Его внедрение в состав экспонирующего оборудования позволило:

- повысить качество переноса изображения проекционной экспонирующей системы за счет возможности оперативного слежения за плоскостью резкого изображения объектива;
- повысить точность совмещения проекционной экспонирующей системы за счет возможности оперативного слежения за масштабом проекционного объектива;
- повысить производительность проекционной экспонирующей системы за счет исключения времени на периодические остановки рабочего цикла для измерения текущей плоскости резкого изображения и текущего масштаба проекционного объектива.

THE DEVICE FOR DEFINITION THE BEST IMAGE PLANE AND SCALE OF PROJECTION LENS IN REAL TIME

A.S. AGEICHENKO, U.E MATJUSHKOV

Abstract

Factors that influence on position of the best image plane of projection lens during exposure are considered. Device for definition of the best image plane and scale of the projection lens image in real time is described.

Літэратура

1. United States Patent No 5,883,704. [Electronic resource]. Режим доступа: <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=/netahtml/PTO/srchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=5,883,704.PN.&OS=PN/5,883,704&RS=PN/5,883,704>.
2. United States Patent No 6,617,555. [Electronic resource]. Режим доступа: <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=/netahtml/PTO/srchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=6,617,555.PN.&OS=PN/6,617,555&RS=PN/6,617,555>.
3. United States Patent No 6,501,534. [Electronic resource]. Режим доступа: <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=/netahtml/PTO/srchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=6,501,534.PN.&OS=PN/6,501,534&RS=PN/6,501,534>.
4. United States Patent No 4,506,977. [Electronic resource]. Режим доступа: <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=/netahtml/PTO/srchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=4,506,977.PN.&OS=PN/4,506,977&RS=PN/4,506,977>.
5. United States Patent No 5,581,324. [Electronic resource]. Режим доступа: <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=/netahtml/PTO/srchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=5,581,324.PN.&OS=PN/5,581,324&RS=PN/5,581,324>.
6. United States Patent No 5,489,966. [Electronic resource]. <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=/netahtml/PTO/srchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=5,489,966.PN.&OS=PN/5,489,966&RS=PN/5,489,966>.
7. Пат. 9243 Респ. Беларусь // Афіцыйны бюл. Вынаходствы. Карысныя мадэлі. Прамысловыя узоры. 2007. №2. С. 174.
8. Пат. 4940 Респ. Беларусь // Афіцыйны бюл. Вынаходствы. Карысныя мадэлі. Прамысловыя узоры. 2008. №6. С. 216.
9. Пат. 6048 Респ. Беларусь // Афіцыйны бюл. Вынаходствы. Карысныя мадэлі. Прамысловыя узоры. 2010. №1. С. 212.