

КОНТРОЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОДВИЖНЫХ ЛИНЗ В ПРОЕКЦИОННОМ ОБЪЕКТИВЕ ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СВЕРХБОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

© 2007 г. А. Б. Бельский, канд. техн. наук; В. С. Анчуткин, канд. физ.-мат. наук; С. А. Урвачев
ОАО “Красногорский завод им С.А. Зверева”, г. Красногорск, Московская обл.
E-mail: postbox@zenit.istra.ru

Приведено описание интегрированных в конструкцию емкостных датчиков, обеспечивающих измерение смещения и углов наклона подвижной оправы линзового модуля системы компенсации изменений масштаба изображения, обусловленных термобарической расстраиваемостью фотолитографического проекционного объектива. Представлены методика выбора оптимальных конструктивных параметров емкостных датчиков, алгоритм расчета смещения и углов наклона по измеренным значениям электрической емкости датчиков и оценочный расчет погрешности измерения для различных диапазонов перемещения.

Коды OCIS: 110.3960.

Поступила в редакцию 21.04.2006.

Введение

Современные технологии крупносерийного производства сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) основаны на методах проекционной фотолитографии в УФ и глубоком УФ диапазонах спектра. Использование методов иммерсионной фотолитографии ($\lambda = 193$ нм) позволяет реализовать производство СБИС с технологическими нормами (минимальными топологическими размерами элементов) до 45 нм и, возможно, вплоть до 32 нм [1–3].

Наиболее важной составной частью фотолитографической установки в техническом и финансовом аспектах ее разработки является проекционный объектив (ПО), который по существу определяет ее основные технические характеристики и параметры.

Помимо высокой разрешающей способности, ПО фотолитографической установки должен сохранять стабильность своих технических характеристик и параметров в течение всего технологического цикла процесса производства СБИС. Одним из важных в этом плане параметров установки является масштаб, с которым топологическая структура на фотошаблоне, расположенном в предметной плоскости ПО, воспроизводится в слое фоторезиста на полупроводниковой пластине, расположенной в плоскости изображения ПО.

Коррекция изменений масштаба, возникающих вследствие влияния факторов окружающей среды, проводится путем перемещения плоскостей расположения фотошаблона и полупроводниковой пластины при одновременной компенсации термобарической расстраиваемости ПО, которая осуществляется за счет перемещения, как правило, не менее двух линз ПО. Точность позиционирования указан-

ных выше объектов и алгоритмы управления их перемещением определяются разрешающей способностью и конструктивным решением ПО.

Публикаций, посвященных вопросам контроля перемещений подвижных линз в ПО фотолитографических установок, в доступных нам источниках информации не обнаружено. Настоящая статья является попыткой восполнить этот пробел.

Выбор метода и способа контроля перемещений подвижных линз в ПО

Для перемещения линз вдоль оптической оси каждый линзовый модуль содержит по крайней мере две оправы: наружную неподвижную и внутреннюю подвижную.

Для вертикального перемещения внутренней оправы в линзовом модуле используются прецизионные линейные приводы, чаще всего пьезотолкатели (пьезоприводы). Так как линзы современных ПО фотолитографических установок имеют большой диаметр и вес, для обеспечения линейного перемещения без перекосов необходимо не менее трех приводов, распределенных равномерно по окружности оправ.

Современные пьезоприводы имеют высокие точностные характеристики, однако им присущи и недостатки: гистерезис, низкая повторяемость и др. При испытаниях линейных приводов микронного диапазона [4] были выявлены различные точность и повторяемость позиционирования при линейном, волновом, псевдоволновом (quasi-pilgrim) и случайном перемещениях. Большое влияние на эти параметры оказывает также шаг позиционирования. Так, при очень малых (менее 1 мкм) и больших (более 10 мкм) перемещениях получают худшие точность

и повторяемость, чем при перемещениях на несколько микрометров. Влияние этих факторов может быть устранено в системе управления перемещением, однако для эффективного управления необходима достоверная информация об объекте управления [5], т. е. о реальном смещении подвижной оправы линзового модуля.

Некоторые модели современных пьезопроводов имеют интегрированные датчики перемещений (тензорные, индуктивные или емкостные). Эти датчики дают информацию о непосредственном смещении подвижной части пьезопровода. При юстировке линзового модуля можно получить калибровочную характеристику зависимости смещения внутренней оправы от перемещения привода. Однако для производства СБИС с технологической нормой 0,25 мкм и менее используются фотолитографические установки, ПО которых состоят из нескольких десятков линзовых модулей и имеют вес несколько сотен килограммов. При сборке такой конструкции возникают смещения и деформации деталей линзовых модулей. Таким образом, достигнутая при автономных испытаниях точность перемещения линзового модуля может быть потеряна при сборке ПО. Для компенсации влияния этих факторов целесообразно применить датчики перемещения непосредственно оправ, а не приводов.

Перемещение внутренней оправы линзового модуля без перекосов возможно лишь при обеспечении синхронных и одинаковых перемещений толкателей всех приводов. Реализация схемы управления перемещением внутренней оправы, обеспечивающей указанное условие, требует наличия на оправках линзового модуля не менее трех датчиков, расположенных симметрично по их окружностям. Для вышеперечисленных целей возможно применение следующих типов датчиков перемещения: оптических, тензорных, индуктивных и емкостных [5].

Для измерения смещений менее 1 мкм с точностью до нескольких нанометров из множества оптических датчиков применимы только лазерные интерферометры. Они очень дороги, громоздки, интеграция 3-х датчиков в линзовый модуль конструктивно проблематична; кроме того, их применение требует также компенсации влияния изменения температуры и давления.

От всех вышеперечисленных недостатков свободны тензорные датчики, и они нашли широкое применение в качестве датчиков перемещения, интегрированных в пьезопроводы, но в OEM¹-приложениях их использование практически невозможно из-за необходимости компенсации влияния изменений статических механических нагрузок, не связанных с перемещением.

¹ OEM – original equipment manufacture.

Применение параметрических датчиков (индуктивных и емкостных) сдерживает очень существенный фактор – собственные индуктивности и емкости конструкции, однако их влияние может быть значительно снижено при выполнении определенных требований к конструкции: симметрия, замкнутость и экранирование. Использование индуктивных датчиков предпочтительно в диапазоне перемещений от десятков микрометров до нескольких миллиметров при требуемой точности 0,1–1 мкм, так как их точность повышается с увеличением размеров измерительной индуктивности. Емкостные датчики могут быть с изменяемой площадью и с изменяемым зазором. Так как при смещениях в несколько микрометров трудно получить существенное изменение площади конденсатора, то в рассматриваемой системе возможно применение емкостных датчиков с изменяемым зазором. В отличие от индуктивных точность емкостных датчиков с изменяемым зазором повышается с уменьшением диапазона перемещений.

Результаты анализа диапазона применяемости и точности датчиков различных типов с оценкой их стоимости по материалам “Space Age Control, Inc” (Palmdale, CA USA) приведены на рис. 1.

Из всех датчиков перемещения, основанных на разных физических принципах, для диапазонов перемещений от нескольких единиц до сотни микрометров наиболее эффективными являются емкостные датчики.

Возможны четыре варианта конструктивного решения размещения емкостных датчиков в линзовом модуле:

1. Использование готовых высокоточных датчиков. Современные емкостные датчики перемеще-

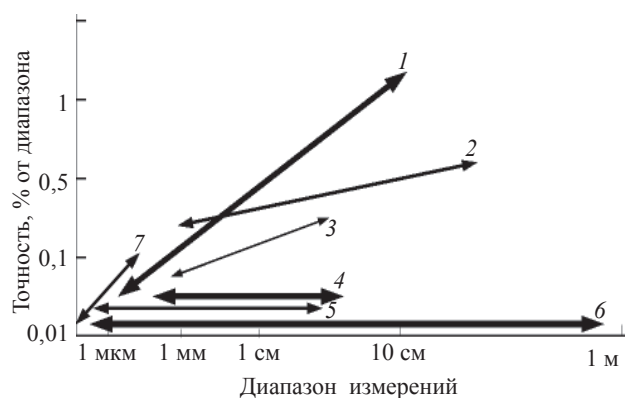


Рис. 1. Диаграмма диапазонов применяемости и точности датчиков перемещения различных типов с оценкой стоимости. 1 – энкодерные, 2 – ультразвуковые, 3 – потенциометрические, 4 – магнорестрикционные, 5 – индуктивные, 6 – лазерные, 7 – емкостные. Стоимость: 3 – менее 50; 2, 5, 7 – 50–500; 1, 4, 5 – более \$ 500.

ний для необходимого диапазона перемещений имеют высокую точность (до 0,01 нм) и линейность (до 0,003%), небольшие габаритные размеры. Электроника, входящая в комплектацию датчиков, обеспечивает компенсацию влияния паразитных емкостей и линеаризацию характеристики. Их применение ограничивает только высокая стоимость (более 1000 у. е. датчик и более 2000 у. е. электроника к нему). Кроме того, перед использованием таких датчиков необходимо точно выставить зазор между обкладками и их параллельность, тогда точность измерения ограничивается точностью юстировки.

2. *Использование подвижной и неподвижной оправ линзового модуля в качестве обкладок емкостного датчика.* Конструктивно это самый простой вариант. Однако применение такой конструкции требует взаимной электрической изоляции обеих оправ друг от друга, а также внешней оправы от корпуса объектива. Кроме того, емкостной датчик подобной конструкции будет иметь большую, а главное, непостоянную паразитную емкость, что снизит точность и повторяемость измерений. Самым непреодолимым препятствием в применении этой конструкции является изменение паразитных емкостей автономно настроенного линзового модуля после сборки объектива из-за появления дополнительных паразитных емкостей с соседними линзовыми модулями.

3. *Напыление обкладок емкостных датчиков на поверхности оправ, изготовленных из диэлектрических материалов.* Такое конструктивное решение позволяет получить наибольшую точность измерений при довольно простой процедуре юстировки емкостных датчиков благодаря параллельности плоскости оправы и плоскости обкладки датчика, достигаемой за счет технологии напыления. Однако эта конструкция имеет один существенный недостаток: необходимость использовать для изготовления обеих оправ линзового модуля диэлектрических материалов, что не соответствует традиционному подходу к конструированию фотолитографических проекционных объективов. Современные конструкционные материалы вполне могут заменить металлы в оправках проекционных объективов.

4. *Напыление обкладок емкостных датчиков на поверхности диэлектрических подложек, располагаемых на оправках, изготовленных из электропроводящих материалов.* Этот метод является усовершенствованием предыдущей конструкции при изготовлении оправ из проводящих материалов (металлов). Можно разделить электропроводящую оправу и обкладку емкостного датчика слоем диэлектрика, при этом образуется паразитная емкость. Если толщина диэлектрика значительно больше зазора между обкладками или диапазона перемещений (который может быть от нескольких единиц до десятков микро-

метров), то паразитная емкость не будет существенно влиять на точность измерений. Кроме того, влияние паразитной емкости в этом случае может быть скомпенсировано при настройке ввиду ее относительного постоянства. Диэлектрический слой должен иметь толщину порядка 1 мм и, естественно, не может быть изготовлен методом напыления.

Схематично конструкция линзового модуля с емкостными датчиками представлена на рис. 2. Линза 1 крепится на подвижной оправе 4, которая с помощью трех прецизионных линейных приводов 3 перемещается в вертикальной плоскости относительно неподвижной оправы 2. На поверхности оправ расположены электроды 7 емкостных датчи-

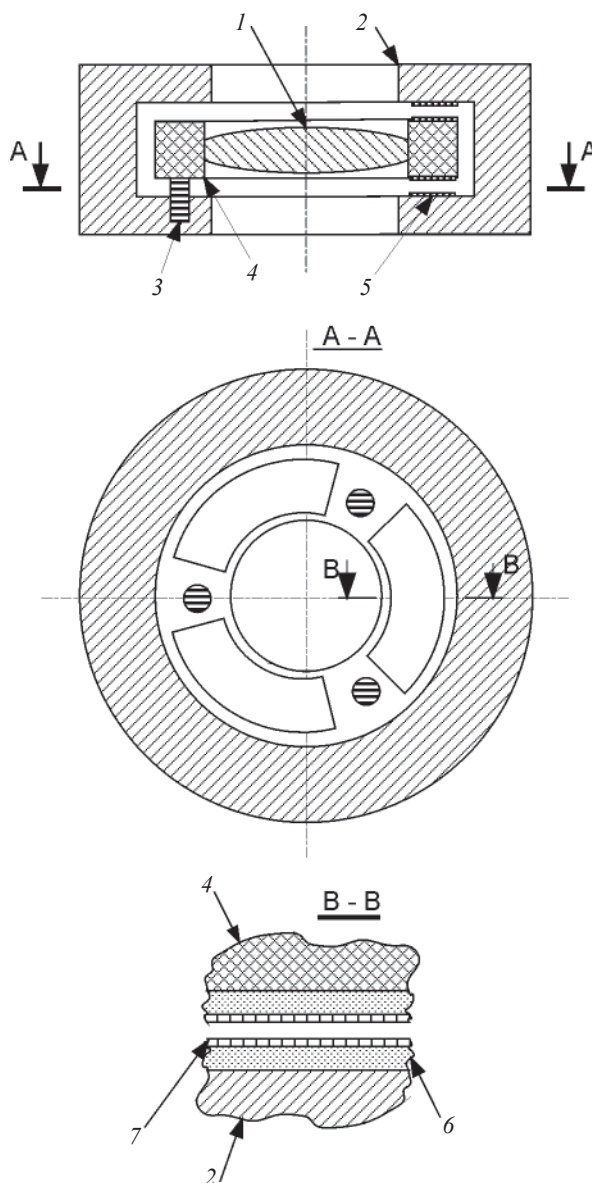


Рис. 2. Конструкция линзового модуля с емкостными датчиками. 1 – линза, 2 – неподвижная оправа, 3 – линейный привод, 4 – подвижная оправа, 5 – емкостной датчик, 6 – диэлектрическая подложка, 7 – электрод емкостного датчика.

ков перемещения 5. Электроды выполнены методом напыления проводникового тонкопленочного слоя либо непосредственно на оправы, изготовленные из диэлектрического материала, либо на диэлектрические подложки 6, изготовленные из материала с высокой адгезией к тонким пленкам и закрепленные на оправках из электропроводящих материалов. Электроды образуют три пары дифференциальных конденсаторов, расположенных по окружности оправ и смещенных относительно друг друга на 120° .

Для повышения точности измерения смещения электроды должны занимать максимально возможную площадь, образованную пересечением проекции подвижной оправы на внутреннюю горизонтальную плоскость неподвижной оправы, не занятую другими устройствами или конструктивными элементами линзового модуля. Площадь электродов емкостного датчика S вышеприведенной конструкции можно определить по формуле

$$S = \pi k_S (R_1 + R_0)(R_1 - R_0)/6, \quad (1)$$

где k_S – коэффициент эффективного использования площади; R_1 – наружный радиус электродов, ограниченный наружным радиусом подвижной оправы; R_0 – внутренний радиус электродов, который определяется большим из значений внутренних радиусов подвижной или неподвижной оправ.

Для повышения точности измерения смещения воздушный зазор между электродами должен быть минимальным, однако при наклоне вертикальной оси подвижной оправы относительно вертикальной оси неподвижной оправы при минимальном заданном смещении не должно происходить электрического замыкания электродов емкостного датчика. Минимально допустимый зазор d_{0S} между электродами для предотвращения электрического замыкания при наклоне можно рассчитать по формуле

$$d_{0S} = (R_1 - R_0)(1 + \sqrt{3})\sin \alpha_{\max}/2, \quad (2)$$

где α_{\max} – максимально допустимый наклон подвижной оправы относительно неподвижной.

При вертикальном смещении и наклоне подвижной оправы относительно неподвижной изменяется воздушный зазор между электродами. Величину зазора для точек геометрической середины емкостных датчиков d_i можно рассчитать по следующей формуле:

$$d_i = d_0 + d_{0S} + L + (R_1 + R_0) \times [\sin \alpha \cos(\delta + 2\pi i/3) + \cos \beta \sin(\delta + 2\pi i/3)]/2, \quad (3)$$

где $i = 1, 2, 3$ – номер датчика; d_i – величина зазора i -го датчика, d_0 – минимальный технологический зазор между электродами емкостных датчиков, L – заданное вертикальное смещение оправ линзового

модуля, α, β – углы наклона внутренней оправы относительно внешней в двух взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостях, δ – угол смещения 1-го датчика в горизонтальной плоскости относительно оси наклона α .

При изменении воздушного зазора между электродами емкостного датчика изменяется его электрическая емкость, которая для плоского конденсатора определяется как

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 S/d, \quad (4)$$

где $\varepsilon \varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость воздуха, S – площадь обкладок конденсатора, d – зазор между обкладками (в дальнейшем принимается зазор геометрической середины).

Структурная схема системы компенсации изменений температуры и давления фотолитографического ПО с применением емкостных датчиков приведена на рис. 3.

Измерение электрической емкости датчиков перемещения осуществляется с помощью мостовой схемы, обеспечивающей компенсацию влияния паразитной емкости соединительных проводников между электродами датчиков и измерительной схемой. При юстировке линзового модуля проводится балансировка измерительного моста в средней точке диапазона перемещений линзового модуля. При изменении измеряемой емкости вследствие перемещения оправ линзового модуля в диагонали моста возникает переменное напряжение, пропорциональное изменению реактивного сопротивления датчика. Фаза напряжения разбаланса при увеличении зазора совпадает с фазой опорного напряжения, а при уменьшении зазора находится в противофазе. Сигнал разбаланса измерительного моста подается на фазочувствительный амплитудный детектор, преобразующий переменное напряжение разбаланса моста в постоянное напряжение, пропорциональное амплитуде сигнала, полярностью, определяемой сдвигом фаз опорного и измеряемого сигналов. С выхода фазочувствительного детектора сигнал подается на аналого-цифровой преобразователь, обеспечивающий ввод данных в управляющий компьютер.

По напряжениям на измерительных мостах программным обеспечением комплекса управляющего компьютера определяются значения электрической емкости C_i для трех датчиков [6]:

$$C_i = C_{0i} K_{U_i} / (K_{U_i} + C_{0i} U_i), \quad (5)$$

где C_{0i} – электрическая емкость i -го датчика в среднем положении, K_{U_i} – калибровочный коэффициент, который определяется электрическими емкостями эталонных конденсаторов измерительного моста, частотой опорного сигнала и конструктивными па-

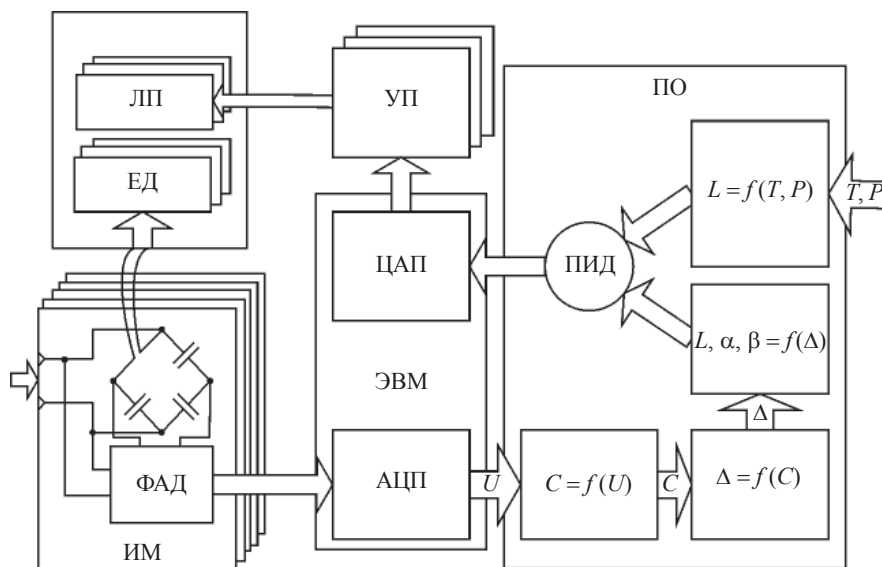


Рис. 3. Структурная схема системы компенсации влияния изменений температуры и давления на масштаб. ЛП – линейный привод, ЕД – емкостной датчик, ИМ – измерительная мостовая схема, ФАД – фазочувствительный амплитудный детектор, ЭВМ – управляющая электронно-вычислительная машина, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ПО – программное обеспечение комплекса управляющего, $C = f(U)$ – алгоритм преобразования напряжения в электрическую емкость, $\Delta = f(C)$ – алгоритм преобразования значения емкости в величину воздушного зазора, $L, \alpha, \beta = f(\Delta)$ – алгоритм преобразования значения воздушного зазора в величину смещения и углов наклона оправы, $L = f(T, P)$ – алгоритм расчета смещения оправы для компенсации влияния изменения температуры и давления, ПИД – алгоритм пропорционального интегрально-дифференциального регулирования смещения оправы, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, УП – схема управления линейным приводом.

раметрами i -го емкостного датчика; U_i – напряжение разбаланса измерительного моста.

При подстановке (3) в (4) получаем

$$C_i = b_{1i} / (b_{2i} + L + b_{3i} \sin \alpha + b_{4i} \cos \beta), \quad (6)$$

где

$$b_{1i} = \varepsilon \varepsilon_0 S_i,$$

$$b_{2i} = d_0 + d_{0S},$$

$$b_{3i} = (R_1 + R_0) \cos(\delta + 2\pi i/3)/2,$$

$$b_{4i} = (R_1 + R_0) \sin(\delta + 2\pi i/3)/2,$$

и затем – систему уравнений:

$$L + b_{3i} \sin \alpha + b_{4i} \cos \beta = b_{1i} / C_i - b_{2i} |_{i=1,2,3}. \quad (7)$$

Решение системы (7) трех линейных уравнений с тремя неизвестными (L , $\sin \alpha$ и $\cos \beta$) позволяет рассчитать смещение и перекос подвижной оправы линзового модуля. Полученные значения используются в качестве сигналов обратной связи в алгоритме ПИД регулирования [7] смещения оправы.

Расчет параметров емкостных датчиков

Далее приводятся результаты расчета параметров емкостного датчика для типового применения в линзовых модулях фотолитографических ПО.

При расчете приняты следующие исходные данные:

внутренний радиус оправ $R_0 = 100$ мм,

внешний радиус оправ $R_1 = 130$ мм,

коэффициент использования площади $K_S = 0,5$,

минимальный технологический зазор $d_{\min} = 1$ мкм,

максимальный наклон $\alpha_{\max} = 10''$,

погрешность измерения емкости $\Delta C = 10$ пФ.

Внутренний радиус оправ в расчете выбран исходя из среднего радиуса линз фотолитографических ПО. Внешний радиус оправ выбран максимально допустимым конструктивно, с тем чтобы обеспечить максимальную площадь емкостного датчика. Значительное уменьшение эффективной площади емкостных датчиков может привести к потере точности измерений, а при увеличении площади электродов увеличивается влияние собственных емкостей конструкции линзового модуля. Коэффициент использования площади выбран равным 0,5 при условии использования половины площади горизонтальной поверхности внутренней подвижной оправы для размещения емкостных датчиков. Минимальный технологический зазор и максимальный наклон выбраны исходя из точности предварительной юстировки линзового модуля, погрешность измерения емкости – на основании оценки паразитной емкости конструкции линзового модуля и ПО с учетом погрешности измерения емкости в мостовых схемах.

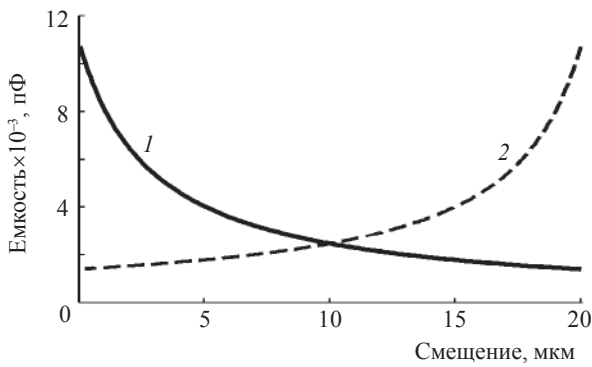


Рис. 4. График зависимости электрической емкости от смещения оправ для прямого (1) и обратного (2) датчиков дифференциальной пары.

Смещение оправ линзового модуля при максимальном наклоне согласно (2) составит $d_{0S} = 1,987$ мкм. Для обеспечения допустимого наклона модуля без замыкания емкостного датчика в конструкции линзового модуля необходимо предусмотреть дополнительный зазор примерно 2 мкм между внутренней и внешней оправками.

Площадь обкладок емкостных датчиков согласно (1) $S = 3612,83$ мм².

При расчете площади обкладок емкостного датчика не учитывалось снижение эффективной площади при наклоне подвижной оправы, так как оно составляет менее 0,001%, что значительно меньше, чем погрешность приведенных расчетов.

Результаты расчета электрической емкости датчиков для линзового модуля без наклонов с диапазоном перемещений 20 мкм приведены на рис. 4.

Оценку погрешности измерений можно провести по формуле

$$\Delta L(L) = \Delta C / (dC/dL(L)), \quad (8)$$

где ΔC – погрешность измерения емкости с учетом паразитной емкости конструкции линзового модуля, $dC/dL(L)$ – крутизна характеристики емкостного датчика при смещении L .

Расчет погрешности измерений проводился по формуле, полученной из (8) путем замены производной на конечные приращения:

$$\Delta L(L) = \Delta C d_L / (C(L) - C(L - d_L)). \quad (9)$$

На рис. 5 приведены графики расчетной погрешности измерения смещения оправ линзового модуля без наклонов с диапазоном перемещений 20 мкм. По результатам расчета можно сделать вывод, что в диапазоне смещений от 0 до 5 мкм для принятых исходных данных емкостные датчики на поверхности оправ линзового модуля могут обеспечить точность измерения до 20 нм.

В диапазоне смещений от 5 до 15 мкм достижимая точность снижается до 100 нм. При больших

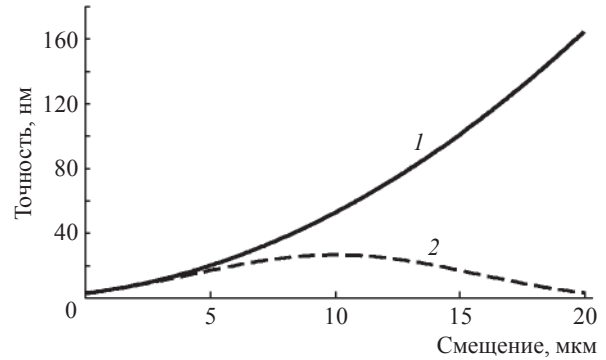


Рис. 5. График зависимости точности измерения смещения оправ емкостными датчиками от заданного смещения. 1 – для одного датчика, 2 – для дифференциальной пары датчиков.

смещения изменения емкости датчиков незначительны и соизмеримы с паразитной емкостью и предельной точностью измерения электрической емкости в мостовой схеме. Так, при смещении оправ линзового модуля 30 мкм реально достижимая погрешность измерения около 1 мкм.

Для обеспечения измерения перемещений линзового модуля с диапазоном 20 мкм и точностью, необходимой для фотолитографических ПО, целесообразно применять дифференциальные емкостные датчики, расположенные с двух сторон внутренней оправы таким образом, что при перемещении оправы в любом направлении емкость одного датчика дифференциальной пары увеличивается, а другого – уменьшается. Используя свойство дифференциального датчика: сумма производных от величины зазора, измеренного от обоих датчиков, равна нулю, можно значительно повысить точность измерений, убрав влияние некоторых систематических и периодических ошибок [8].

В табл. 1 приведены расчетные погрешности измерения перемещения линзового модуля с помощью

Таблица 1. Результаты расчета погрешности измерения перемещения с помощью одного емкостного датчика и дифференциальной пары для различных диапазонов перемещений

Диапазон перемещений, мкм	Максимальная погрешность одного датчика, нм	Максимальная погрешность дифференциального датчика, нм
5	19,7	4,6
10	52,3	9,9
15	100,6	17,0
20	164,5	26,2
25	244,1	37,3
30	339,3	50,3
40	576,6	82,3
50	876,4	122,0
75	1899,7	255,7
100	3314,0	438,2

Таблица 2. Результаты расчета электрической емкости датчиков и погрешности измерений для различных углов наклона и заданных смещений

Угол наклона, угл. с	Заданное смещение, мкм					
	0	10	20	0	10	20
	Электрическая емкость, пФ			Абсолютная погрешность измерения углов наклона, угл. с		
1,0	7795	2267	1327	0,0048	0,0562	0,1637
0,9	8013	2285	1333	0,0046	0,0553	0,1622
0,8	8243	2304	1339	0,0043	0,0545	0,1607
0,7	8487	2322	1345	0,0041	0,0536	0,1592
0,6	8746	2341	1352	0,0039	0,0527	0,1577
0,5	9021	2361	1358	0,0036	0,0519	0,1562
0,4	9314	2380	1364	0,0034	0,0510	0,1547
0,3	9627	2400	1371	0,0032	0,0502	0,1533
0,2	9961	2420	1378	0,0030	0,0494	0,1518
0,1	10320	2441	1384	0,0028	0,0485	0,1504
0,0	10705	2462	1391	0,0026	0,0477	0,1489
-0,1	11120	2483	1398	0,0024	0,0469	0,1475
-0,2	11569	2505	1405	0,0022	0,0461	0,1461
-0,3	12055	2527	1411	0,0021	0,0453	0,1446
-0,4	12584	2550	1418	0,0019	0,0445	0,1432
-0,5	13162	2572	1426	0,0017	0,0437	0,1418
-0,6	13795	2596	1433	0,0016	0,0429	0,1404
-0,7	14492	2619	1440	0,0014	0,0422	0,1390
-0,8	15264	2644	1447	0,0013	0,0414	0,1376
-0,9	16122	2668	1454	0,0012	0,0407	0,1362
-1,0	17082	2693	1462	0,0010	0,0399	0,1349

одного емкостного датчика и дифференциальной пары для различных диапазонов перемещений.

В табл. 2 приведены результаты расчета электрической емкости датчиков перемещений при наклонах подвижной оправы линзового модуля. Оценка погрешности измерения показывает, что даже при использовании дифференциальных датчиков и прочих оптимальных условиях реально можно достичь точности не более 0,03" в диапазоне перемещений 20 мкм. Полученную информацию нельзя использовать в метрологических целях, но после дополнительной обработки, например, с помощью фильтров Калмана [9] она вполне может быть использована в алгоритме регулирования смещения оправ для устранения перекосов.

На рис. 6 приведен график зависимости точности измерения смещения дифференциальным емкостным датчиком от эффективной площади обкладок конденсатора для диапазона смещений 20 мкм.

В приведенных расчетах не учитывался ряд факторов, влияющих на электрическую емкость датчиков и точность измерения (изменение диэлектрической проницаемости при изменении температуры, давления и влажности воздуха, температур-

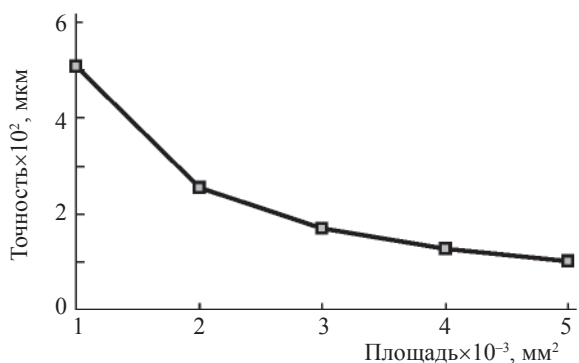


Рис. 6. График зависимости точности дифференциального датчика от площади обкладок конденсатора.

ное расширение электродов емкостных датчиков и др.), в связи с малыми изменениями дестабилизирующих факторов при эксплуатации фотолитографических установок и соответствующим еще меньшим влиянием на параметры, определяющие точность измерений.

Приведенные расчеты показывают возможность применения емкостных датчиков предложенной конструкции для контроля за перемещением подвижной оправы линзового модуля.

Выводы

Предложенное техническое решение задачи контроля перемещений подвижных линз в проекционных объективах фотолитографических установок реализует прямое измерение положения подвижной оправы относительно неподвижной оправы линзы и, следовательно, помимо высокой точности и надежности результатов измерений, открывает широкие возможности для использования различных типов приводов без встроенных датчиков линейных перемещений. По материалам статьи подана заявка на изобретение.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mulkens J. et al.* Immersion Lithography exposure systems: today's capabilities and tomorrow's expectations // Proc. SPIE. V. 5754. 2005. P. 710.
2. *Greville A.* Prospects for Immersion Lithography at the 45 nm Half-Pitch and Beyond // SEMATECH Future Fab Intl. 2006. V. 20.
3. *Hand A.* Hyper-NA Immersion Faces Polarization Challenges // Semiconductor International. 2006. February. 30 p.
4. *Fisher J.* The Top Five Motion Application Mistakes... and How to Avoid Making Them // Photonics Spectra. 2005. № 10. P. 94–98.
5. *Moioni K.* Ensuring nanopositioner accuracy requires sensor monitoring and careful x - y stage design // SPIE's OE MAGAZINE. 2002. № 6. P. 40.
6. *Дворяшин Б.В., Кузнецов Л.И.* Радиотехнич. измер. // Учебн. пособие для вузов. М.: Сов. радио, 1978. 360 с.
7. *Егоров А.И.* Основы теории управления. М.: ИФ Физ.-мат. лит., 2004. 504 с.
8. *Маркин Н.С.* Основы теории обработки результатов измерений. М.: Изд. стандартов, 1991. 173 с.
9. *Haykin S.* Kalman Filtering and Neural Networks // Communications Research Laboratory, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada; John Wiley & Sons, Inc. 2001. P. 202.