

УДК 621.38

## МЕТОД И УСТАНОВКА КОНТРОЛЯ ПЛОСКОСТНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН

Пилипенко В. А.<sup>1</sup>, Петлицкий А. Н.<sup>1</sup>, Горушко В. А.<sup>1</sup>, Шведов С. В.<sup>1</sup>, Понарядов В. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Интеграл», г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

*Предложен метод и разработана установка лазерного контроля стрелы прогиба и профиля изгиба полупроводниковых пластин. Метод основан на регистрации отклонения отраженного лазерного луча от положения, соответствующего отражению от идеально плоской поверхности. Установлено, что по результатам определения угла наклона касательной в любой точке поверхности, определяемой путем сканирования полупроводниковой пластины лазерным лучом, возможно определение ее профиля изгиба.*

### Введение

Одним из основных требований к полупроводниковым пластинам при создании СБИС с применением проекционной фотолитографии является их высокая плоскостность, поскольку при большой величине изгиба пластин затруднено проведение качественного экспонирования фоторезиста по всей ее площади. Поэтому разработка достаточно простых и надежных методов и приборов, позволяющих контролировать плоскостность полупроводниковых пластин в условиях автоматизированного промышленного производства, является актуальной задачей.

В настоящее время используются различные методы контроля плоскостности прецизионных поверхностей, как бесконтактные, так и контактные. К бесконтактным методам относятся пневматические, емкостные, рентгенографические, оптические, интерферометрические, голографические и другие. Контактные методы основаны на механической профилометрии и сканировании поверхности индикаторными головками.

Однако существующие методы не обеспечивают достаточно точный, экспрессный и автоматизированный контроль плоскостности полупроводниковых пластин.

### Основная часть

Для характеристики плоскостности полупроводниковых пластин обычно пользуются

такими понятиями, как радиус кривизны или стрела изгиба [1]. Под стрелой изгиба понимается отрезок перпендикуляра, опущенного из точки, максимально отстоящей от прямой, соединяющей два диаметрально противоположных конца пластины. Связь между стрелой изгиба  $f$  и радиусом кривизны  $\rho$  задается выражением:

$$f = R^2(2\rho)^{-1}, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус пластины.

Это выражение получено из предположения, что профиль изгиба пластины представляет собой часть окружности радиуса  $\rho$ , а стрела изгиба значительно меньше диаметра пластины  $D$ .

Исходя из такого предположения, рассмотрим отражение лазерного луча от двух произвольных точек выпуклой поверхности, лежащих на одном диаметре пластины (рисунок 1); для вогнутой поверхности рассуждения будут аналогичными.

При совмещении точек  $E$  и  $F$ , что соответствует схеме с одним лучом и перемещением образца, видно, что смещение луча на экране  $l$  равно  $FK-EN$  при сдвиге образца из точки  $A$  в точку  $D$ . При этом расстояние между лучами или смещение образца из одного положения в другое  $d = BA - CD$ . Рассматривая подобные треугольники  $\triangle OCD$  и  $\triangle DEN$ ,  $\triangle OBA$  и  $\triangle AFL$  и учитывая, что  $EM = MN$ , а  $FL = LK$  (т.к.  $ED \gg EN$  и  $FA \gg FK$  поскольку  $f \ll \rho$ ), то  $FL = BA \cdot AL/OA$  и  $EM = CD \cdot MD/OD$ .

Вычитая одно выражение из другого и учитывая, что  $OA = OD$  и  $AL = MD$ , получаем:

$$FL - EM = \frac{AL(BA - CD)}{OA}. \quad (2)$$

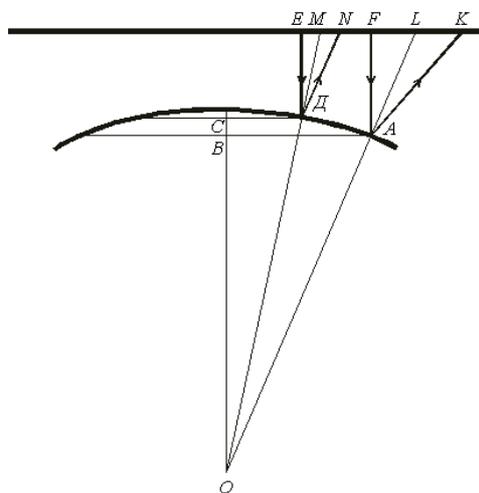


Рисунок 1 – Ход лучей при отражении лазерного луча от двух точек, лежащих на одном диаметре, для выпуклой поверхности

Подставляя в выражение (2) значения входящих в него величин получаем выражение для радиуса кривизны:

$$\rho = 2dLl^{-1}, \quad (3)$$

где  $L$  – расстояние от образца до экрана.

Таким образом, для измерения радиуса кривизны пластины достаточно определить смещение луча на экране при смещении образца по одному из диаметров на любую заранее заданную величину. Для проверки правильности выбранной модели изгиба полупроводниковых пластин голографическим методом оценивалась форма их изгиба, которая показала, что 82 % пластин имеют сферическую форму изгиба (рисунок 2), а 18 % несферическую форму (рисунок 3). При этом из этих 18 %, большая часть (~70 %) имеет очень малую стрелу изгиба (1–5 мкм). Для определения стрелы изгиба таких пластин целесообразно определять их профиль изгиба в плоскости, перпендикулярной плоскости пластины.

Для решения данной задачи рассмотрим возможность по смещению лазерного луча при отражении его от поверхности пластины определять ее отклонение от идеальной плоскости. С целью упрощения рассуждений рассмотрим профиль изгиба пластины в виде части сферы и построим падающий и отраженный лучи от ря-

дом расположенных точек (рисунок 4). Найдем угол наклона касательной  $AB$  к точке падения лазерного луча  $A$ . Из подобия треугольников  $\triangle ABD$  и  $\triangle AKM$  видно, что  $\text{tg}\angle BAD = KM/KA$ . Зная угол наклона можно определить отклонение  $BD$  впереди расположенной точки  $B$  от прямой  $SA$ , которое будет равно:

$$BD = \frac{AD \cdot KM}{KA}. \quad (4)$$

Однако для больших радиусов кривизны и малого расстояния между соседними точками ( $AD \ll SA$ ) можно считать, что касательная к точке  $A$  будет лежать очень близко от самой сферы. В этом случае точку на касательной  $B$  можно рассматривать как точку, расположенную на поверхности сферы, и тогда величина  $BD$  будет представлять собой отклонение поверхности сферы от прямой  $SA$  в точке  $B$ .

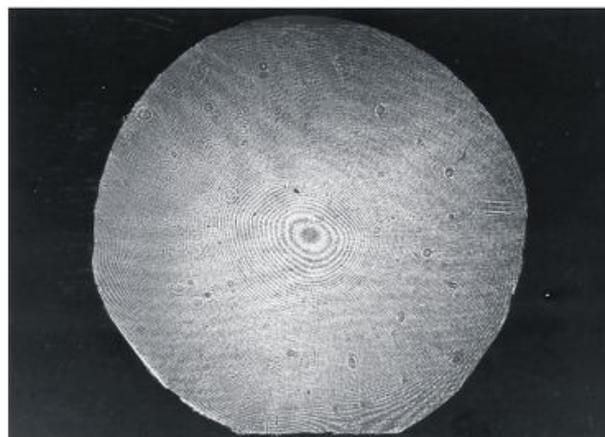


Рисунок 2 – Интерферограмма пластины, имеющей сферическую форму изгиба



Рисунок 3 – Интерферограмма пластины, имеющей несферическую форму изгиба

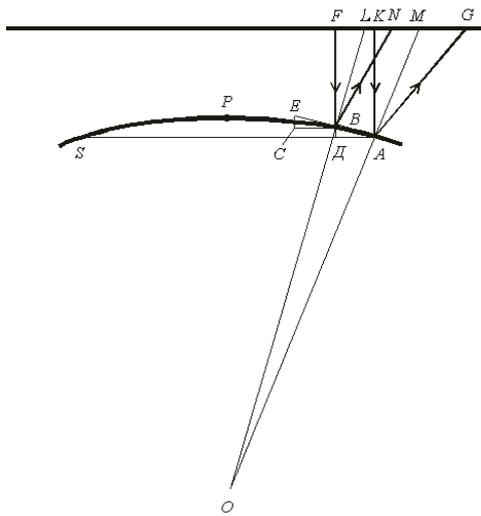


Рисунок 4 – Ход лучей при отражении лазерного луча от двух близко расположенных точек на одном диаметре пластины для выпуклой поверхности

Поскольку, исходя из вышеизложенного,  $KM = MG$ , то подставляя значения величин, входящих в соотношение (4), получаем:

$$f_0 = dl_0(2L)^{-1}, \quad (5)$$

где  $f_0$  – отклонение плоскости пластины от идеальной плоскости в точке, отстоящей от края пластины на расстоянии  $d$ ;

$d$  – расстояние от точки падения луча до рядом лежащей точки, для которой рассчитывается отклонение плоскости пластины от идеальной плоскости ( $d = AD = BC = \dots \ll SA$ );

Таким образом, величина  $f_0$  представляет собой отклонение точки  $B$  от прямой  $SA$ . Для определения отклонения точки  $E$  от прямой  $SA$  необходимо сместить образец на расстояние  $d = AD$  и аналогичным образом определить отклонение точки от прямой  $CB \parallel SA$ , которое будет определяться выражением:

$$f_1 = dl_1(2L)^{-1}, \quad (6)$$

где  $f_1$  – отклонение плоскости пластины от прямой  $CB$  в точке, отстоящей от края пластины на расстоянии  $2d$ ;

$l_1$  – смещение луча из первоначального положения при его отражении от образца.

Тогда отклонение точки  $E$  от прямой  $SA$  будет определяться как сумма величин  $f_0$  и  $f_1$ :

$$f_1 = d(l_0 + l_1)(2L)^{-1}, \quad (7)$$

где  $f_1$  – отклонение плоскости пластины от идеальной плоскости в точке, отстоящей от края пластины на расстоянии  $2d$ .

При перемещении пластины от точки  $K$  до точки  $P$  с шагом  $d$  (рисунок 4) отклонение плоскости пластины от идеальной в каждой последующей точке будет получаться путем сложения расчетной величины и отклонения в предыдущей точке. Сложение ведется до достижения точки поверхности пластины, в которой отклонение луча на экране по отношению к его положению при отражении от идеальной плоскости равно нулю. Это означает, что касательная в данной точке будет параллельна идеальной плоскости. На рисунке 4 такой точкой будет точка  $P$  – вершина сферы. Последующие отклонения точек от прямой  $SA$  определяются путем вычитания из полученного отклонения в точке  $P$  последовательно измеренных отклонений. Согласно этим соображениям, соотношение для построения профиля изгиба поверхности, когда имеется лишь одна точка на поверхности образца, в которой касательная параллельна идеальной поверхности, запишется в виде:

$$f = d(2L)^{-1} \left( \sum_{k=1}^m l_k - \sum_{k=m+1}^n l_k \right), \quad (8)$$

где  $l_k$  – отклонение луча на экране, отраженного от образца в  $k$ -ой точке относительно его положения при отражении от идеальной поверхности;

$m$  – количество измерений до точки, в которой касательная к поверхности образца параллельна идеальной поверхности;

$n$  – количество измерений после прохождения точки, в которой касательная к поверхности образца параллельна идеальной поверхности.

Следовательно, по измеренным отклонениям поверхности пластины от идеальной плоскости можно построить ее профиль в плоскости, перпендикулярной плоскости пластины.

Одной из особенностей построения профиля изгиба пластины является необходимость наблюдения за перемещением луча только по одной координате. Это объясняется тем, что информацию о профиле поверхности пластины несет только отклонение луча вдоль линии пересечения плоскостей, перпендикулярной и параллельной плоскости пластины и отстоящей от нее на некотором расстоянии  $L$ .

Это означает, что если представить экран в виде плоскости  $C$ , параллельной плоскости пластины  $B$ , где ось  $y$  совпадает с линией пересечения плоскостей  $C$  и  $A$ , а ось  $x$  перпендикулярна плоскости  $A$  (рисунок 5), то измерение перемещения луча необходимо проводить только по  $y$ -координате. В случае ухода луча с прямой  $FG$ , как показано на рисунке 5, об отклонении луча судят по величине отрезка  $MN$ , представляющего собой  $y$ -координату точки  $K$ .

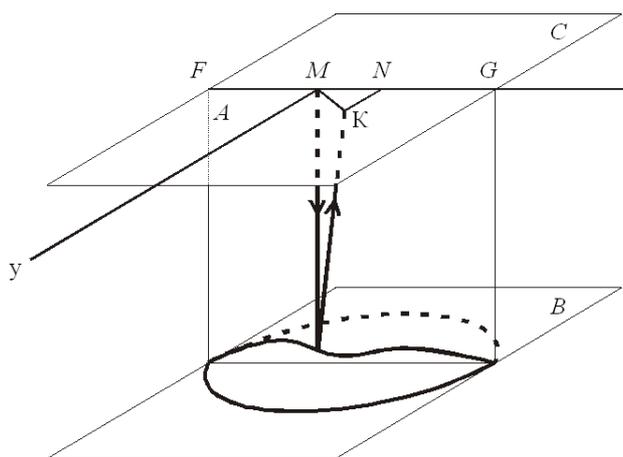


Рисунок 5 – Схематическое изображение отражения узкого луча света от пластины со сложным профилем изгиба

Для достижения наилучшего разрешения большую роль играет выбор расстояния от образца до экрана, поскольку смещение луча на экране прямо пропорционально этому расстоянию. При малом расстоянии и изгибе пластин смещение на экране будет небольшим, что приведет к большой ошибке в определении стрелы изгиба. При использовании большого расстояния будет невозможно определять стрелу изгиба при ее большой величине из-за выхода луча из поля зрения микроскопа, равного 6,4 мм, а также приведет либо к увеличению габаритов установки, либо к введению дополнительной оптической системы.

На основании выше приведенных результатов зависимость величины отклонения луча на экране от расстояния между образцом и экраном для различных прогибов пластины диаметром 100 мм может быть представлено как:

$$l = 16dfLD^{-2}. \quad (9)$$

Анализ соотношения (9) показал, что для построения профиля изгиба пластин до 180 мкм

и точностью определения 7,9 мкм необходимо брать расстояние от образца до экрана  $\sim 30$  см. Верхний предел по построению профиля изгиба обуславливается величиной поля зрения применяемого микроскопа. При определении же стрелы прогиба  $c/f > 180$  мкм ее величину можно определять с использованием меньшего перемещения, т.е. верхний предел измерения стрелы изгиба практически неограничен. Установлено, что наиболее приемлемым расстоянием между образцом и экраном, обеспечивающим максимальную точность при построении профиля изгиба ( $\pm 0,027$  мкм) является  $L = 30$  см.

При  $L > 30$  см можно увеличить точность построения профиля, однако это приведет к уменьшению верхнего предела при построении профиля изгиба, а при  $L < 30$  см понижается точность его построения.

Для измерения изгиба и построения профиля поверхности полупроводниковых пластин разработана установка, оптическая схема которой приведена на рисунке 6.

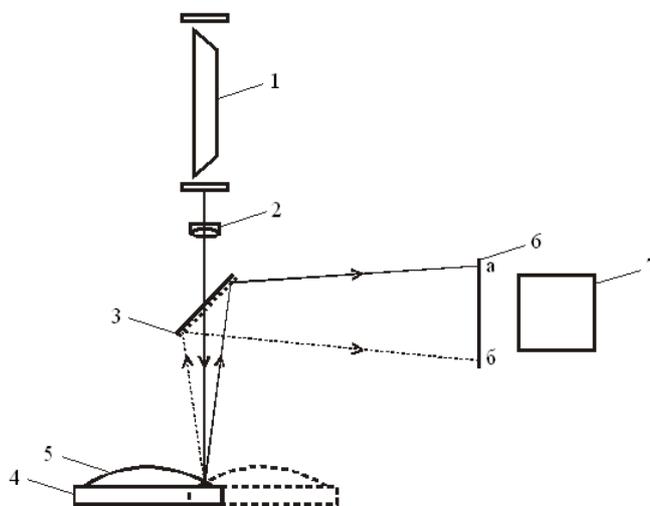


Рисунок 6 – Оптическая схема установки контроля изгиба полупроводниковых пластин: 1 – лазер ЛГ-55; 2 – фокусирующая линза; 3 – полупрозрачное зеркало; 4 – столик для перемещения образца; 5 – исследуемый образец; 6 – экран; 7 – микроскоп с микрометрическим винтом МОВ-1 15

Для получения узкого пучка света в оптической схеме используется лазер ЛГ-55 1 с фокусирующей линзой 2, фокусное расстояние которой равняется расстоянию от линзы до экрана с учетом хода лучей. Для точного определения смещения луча на экране 6 используется микроскоп МБС-2 7, снабженный микро-

метрическим оптическим винтом МОВ-1-15<sup>х</sup>, с помощью которого определяется смещение луча из положения а в положение б. Точность перемещения образца составляет 0,1 мм, определения положения луча на экране – 7,9 мкм, что обеспечивает точность в определении стрелы прогиба  $\pm 0,3$  мкм, а в построении профиля изгиба полупроводниковых пластин –  $\pm 0,027$  мкм.

Поскольку информацию о профиле изгиба пластины несет только у-координата, то появляется возможность автоматизации данного метода контроля, а именно автоматизации систем сканирования и построения профиля изгиба. Для достижения данной цели осуществлялось автоматическое перемещение столика с исследуемой пластиной относительно лазерного луча и определение величины отклонения отраженного от образца луча, по отношению к его положению при отражении от идеальной плоскости. С этой целью в установке вместо экрана использовалась специальная линейка фотодиодов высотой 10 мм и шириной 5 мм, что позволяло осуществлять построение профиля изгиба пластины со стрелой изгиба до 100 мкм. Для учета люфта предметного столика имелся канал коррекции, автоматически учитывающий данное явление.

Общий вид установки контроля профиля изгиба полупроводниковых пластин представлен на рисунке 7.

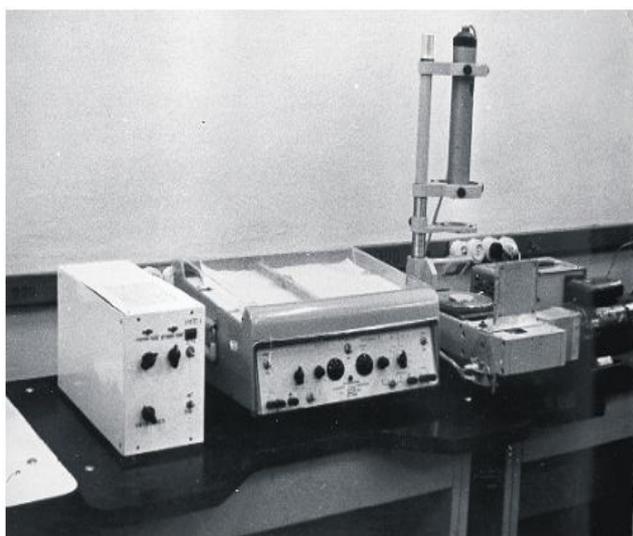


Рисунок 7 – Общий вид автоматической установки контроля профиля изгиба полупроводниковых пластин

Точность построения профиля на данной установке составляет  $\pm 0,027$  мкм. Примеры построения профиля поверхности кремниевых пластин диаметром 100 мм на данной установке приведены на рисунке 8.

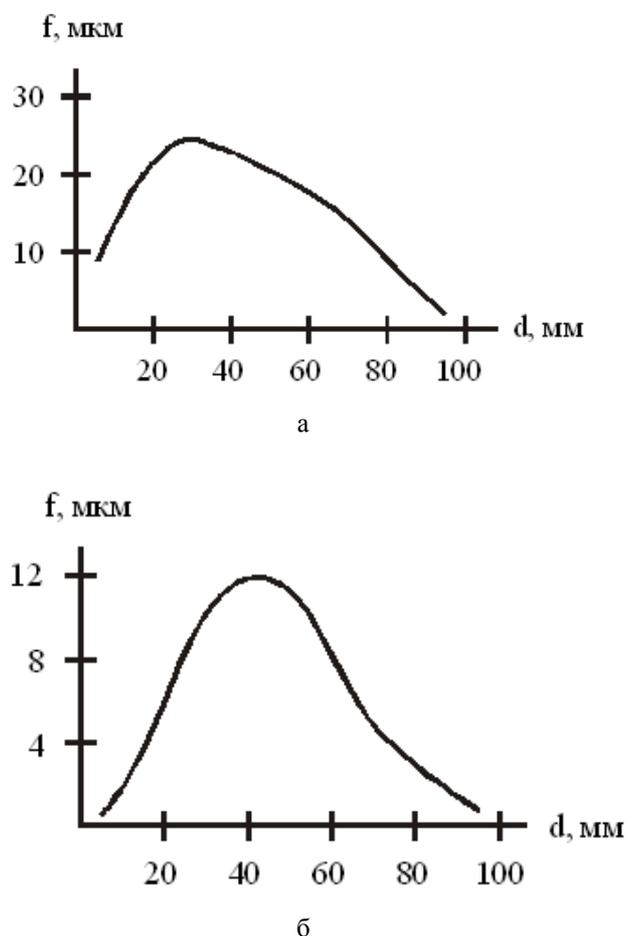


Рисунок 8 – Профиль изгиба полупроводниковой пластины диаметром 100 мм со стрелой прогиба 24 мкм (а) и 12 мкм (б)

### Заключение

1. Показано, что определение смещения отраженного лазерного луча, перпендикулярно падающего на исследуемую поверхность кремниевой пластины, при ее перемещении по одному из диаметров на любую заданную величину, позволяет определять стрелу прогиба исследуемой пластины.

2. Установлено, что на основании определения угла наклона касательной в любой точке поверхности за счёт регистрации отклонения отраженного лазерного луча от положения, соответствующего отражению от идеально плос-

кой поверхности, путем ее сканирования по одному из диаметров пластины можно определить профиль ее изгиба.

3. Разработаны установки контроля стрелы прогиба и профиля изгиба кремниевых пластин, обеспечивающие точность определения стрелы прогиба  $\pm 0,3$  мкм и профиля изгиба  $\pm 0,027$  мкм для кремниевых пластин диаметром до 200 мм при точности смещения образца в процессе сканирования  $\pm 0,1$  мм.

4. Разработанный метод и установки позволяют проводить прецизионный, экспрессный и автоматизированный контроль деформацион-

ных явлений в кремниевых пластинах при создании СБИС с субмикронными нормами проектирования.

### Список использованных источников

1. Пилипенко, В.А. Лазерный метод контроля профиля изгиба кремниевых пластин / В.А. Пилипенко [и др.] // Материалы 28-ой Международной конференции «Композиционные материалы в промышленности. – Ялта. – 2008. – С. 354.

---

Pilipenko V. A., Petlitsky A. N., Gorushko V. A., Shvedov S. V., Ponaryadov V. V.

### Method and control set-up of silicon wafer flatness

The method was suggested and the laser control set-up was developed of the arrow bend and bend profile of the semiconductor wafers. It was established, that on the basis of determining the inclination angle of tangent at any point of the surface due to deflection registration of the reflected laser beam from the position, corresponding to reflection from the ideally flat surface, by means of its scanning by one of the wafer diameters it is possible to determine its bend profile.

*Поступила в редакцию 10.11.2010.*