

В. В. БИНДЮК

**ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ
ПОЛОЖЕНИЯ СЕЧЕНИЯ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА
НА ПОДВИЖНОМ ИНТЕРФЕЙСЕ**

Предложен мехатронный модуль, объединяющий оптоэлектронный преобразователь регистрации малых смещений изображения со средствами линейного перемещения механической системы, позволяющий получить разрешающую способность 10^{-5} мм от заданного положения стрелы изгиба упругих микроэлементов с малой изгибной жесткостью. Полная относительная погрешность оптоэлектронного преобразователя на подвижном интерфейсе составляет 0,09 %.

Ключевые слова: интерфейс, преобразователь, упругий элемент, оптопара, погрешность.

В соответствии с методикой [1] измерение изгибной жесткости ($H = EI$) [2] прецизионных упругих микроэлементов (УЭ) в случае больших упругих перемещений выполняется при условии $\beta = f/L$ (f — стрела прогиба, L — длина УЭ). Значение β изменяется с фиксированным шагом. Исходя из значения β вычисляется коэффициент

$$K = 2F(\alpha, \varphi_k) \sin \alpha (1 - \cos \varphi_k),$$

входящий в номинальную расчетную характеристику косвенно измеряемой жесткости сечения УЭ, связывающую стрелу прогиба, длину УЭ и усилие продольного сжатия (P):

$$H = LPf/2K.$$

Здесь $F(\alpha, \varphi_k)$ — обозначение эллиптического интеграла Лежандра, α — модулярный угол, φ_k — эллиптическая амплитуда концевой точки упругой линии элемента.

Параметром, величину которого необходимо обеспечить с наименьшей погрешностью, является стрела прогиба f УЭ. Поскольку жесткость сечения гибкого упругого стержня на участке, где выполняется закон Гука, есть величина постоянная, отпадает необходимость в непрерывном измерении стрелы f прогиба и достаточно обеспечить $f/L = \text{const}$.

Обеспечить значение $f/L = \text{const}$ можно следующим образом. Пусть имеется некоторая система, содержащая подвижный элемент, на котором установлен бесконтактный преобразователь перемещения (БПП), фиксирующий первоначальное, недеформированное положение УЭ. О том, что положение зафиксировано точно, свидетельствует нулевой уровень сигнала, вырабатываемый БПП. При смещении подвижного элемента совместно с БПП на расстояние f получим некоторое приращение уровня сигнала, которое станет минимальным и сведется к нулю при достижении стрелой прогиба деформируемого УЭ заданного значения.

Для измерения жесткости прецизионных упругих элементов, например баланса приборов времени, наиболее подходят оптико-электронные преобразователи линейных перемещений [3].

На рис. 1 представлена схема оптикоэлектронного преобразователя положения (ОЭПП) стрелы УЭ: 1 — источник излучения, 2 — диафрагма, 3 — микрообъектив, 4 — сечение УЭ, 5 — приемник излучения.

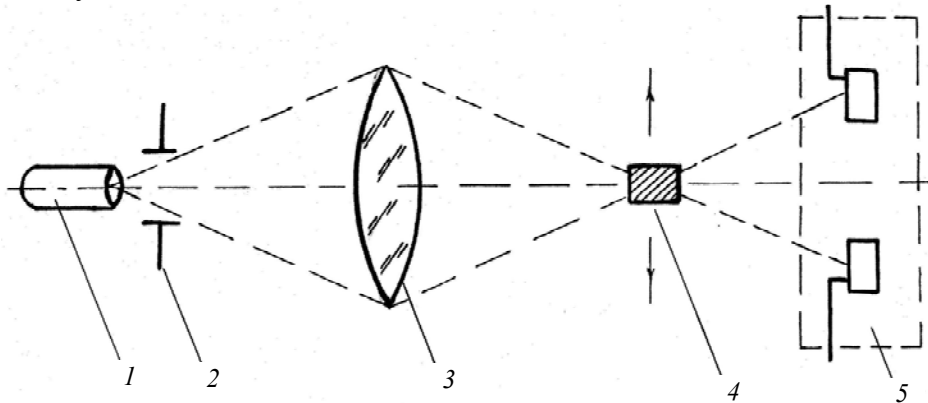


Рис. 1

Поток излучения, в зависимости от смещения торца сечения УЭ относительно оптической оси, попадает на несколько фоточувствительных площадок, сигналы с которых сравниваются между собой. Разностный сигнал в этом случае пропорционален величине смещения изображения относительно нулевого положения.

В схеме можно применять любые источники света, однако более выгодно использовать светодиоды [4], так как они имеют наибольший квантовый выход при малых токах, наилучшую оптическую связь с фотоприемником (благодаря малым габаритам и низким рабочим температурам) и наибольшую скорость переключения (0—10 МГц). Для светодиодов группы GaAs длина волны главной полосы $\lambda=0,91—0,97$ мкм, внешний квантовый выход до 32 % [4].

В качестве источника инфракрасного излучения ОЭПП использован светодиод АЛ-107Б с $\lambda = 0,97$ мкм, полная мощность излучения которого при температуре окружающей среды $-60—+25$ °С и прямом токе 100 мА не менее 10 мВт; постоянное прямое напряжение — 2 В. Минимальная ширина диаграммы направленности на уровне $0,5—40^\circ$, максимальная — на уровне $0,65—120^\circ$.

Поток излучения ИК-части спектра светодиода (1) направляется оптической системой (2—3), на приемник излучения (5). При смещении поперечное сечение УЭ (4) вырезает часть потока излучения и на центральную часть приемника излучения проецируется расфокусированное изображение в виде полоски шириной $h' = K_{oc}h$, где K_{oc} — коэффициент преобразования

оптической системы, h — ширина поперечного сечения УЭ при условии его перпендикулярности оптической оси.

Устройства, содержащие несколько чувствительных элементов, оказываются мало пригодны при регистрации малых смещений изображения объекта слежения из-за невозможности высокой точности измерений, так как практически невозможно подобрать пары элементов с одинаковыми характеристиками (амплитудными и временными).

В качестве приемника излучения использован квадрантный фотодиод ФД-19кк, изготовленный из одной пластины полупроводника (рис. 2) [5].

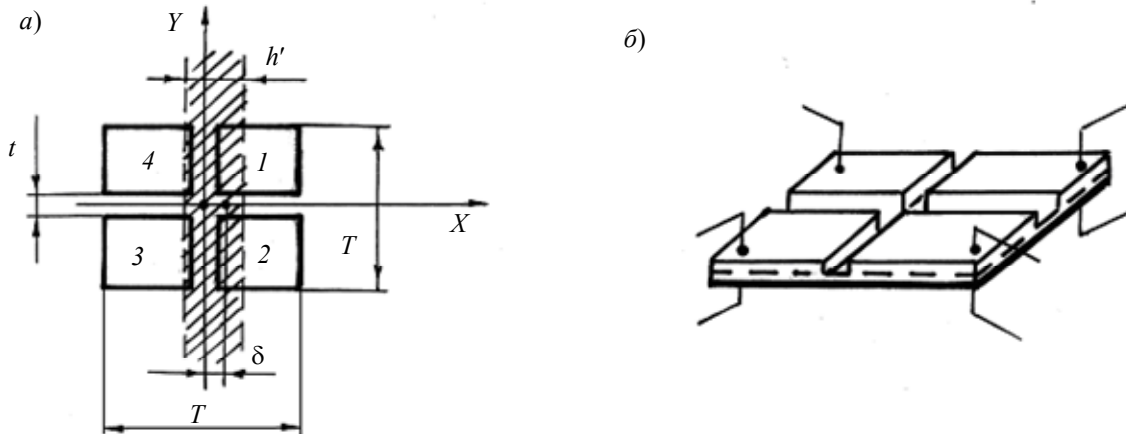


Рис. 2

Фотодиод представляет собой пластину полупроводника размером 2×2 мм с электронно-дырочным переходом, рассеченную под прямым углом двумя прорезями на глубину, превышающую глубину залегания p — n -перехода.

Ширина прорезей t фотодиода ФД-19кк равна 0,05 мм (рис. 2, а). На поверхности каждого из полученных фотодиодов имеются выводы для снятия информации о величине смещения изображения (рис. 2, б).

Уровень сигналов, характеризующих смещение изображения относительно центрального положения вдоль оси X , определяется следующим выражением:

$$I = (I_1 - I_2) - (I_3 - I_4),$$

где I_i ($i=1,2,3,4$) — сигнал, снимаемый с i -го квадранта. При небольших смещениях вдоль оси X полезный сигнал можно записать в виде

$$I = 2(I_1 + I_2)(dF(\delta)/d\delta)\delta,$$

где функция $F(\delta)$ описывает изменение фототока при изменении положения изображения полосы вдоль оси X .

Колебания нулевой точки ФД-19кк за 15—20 часов, по данным работы [6], не превышают ± 4 мкм в фотодиодном режиме. Квадрантный фотодиод малочувствителен к внешнему фону, так как при одновременном попадании фона на все элементы происходит его вычитание.

На рис. 3 приведена функциональная схема ОЭПП стрелы прогиба УЭ.

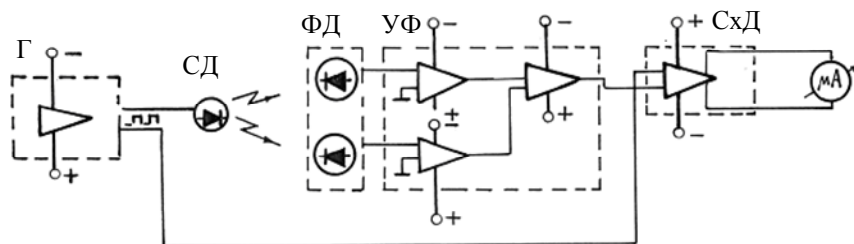


Рис. 3

Генератор (Г), выполненный на микросхеме К155ЛА3, является источником модулированного сигнала светодиода (СД) и опорного сигнала, подаваемого на синхронный детектор

(СхД). Частота основного и опорного сигналов равна 7500 Гц. Усилитель фототока (УФ) выполнен на микросхеме К1У401А; схема синхронного детектора — на К1УТ981.

Источником биполярного напряжения +6,3 и -6,3 В является блок Ф5075 ГСП.

Интерфейсом ОЭПП служит столик с призматическими направляющими трения качения, смещения которого на фиксированные расстояния f задаются размерами образцовых плоскопараллельных мер длины. При этом обеспечивается перпендикулярность оптической оси ОЭПП к плоскости смещения торца сечения УЭ.

Экспериментально получена позиционная характеристика ОЭПП стрелы прогиба УЭ высотой сечения: $b=0,18$ мм и шириной $h=0,03$ мм (рис. 4).

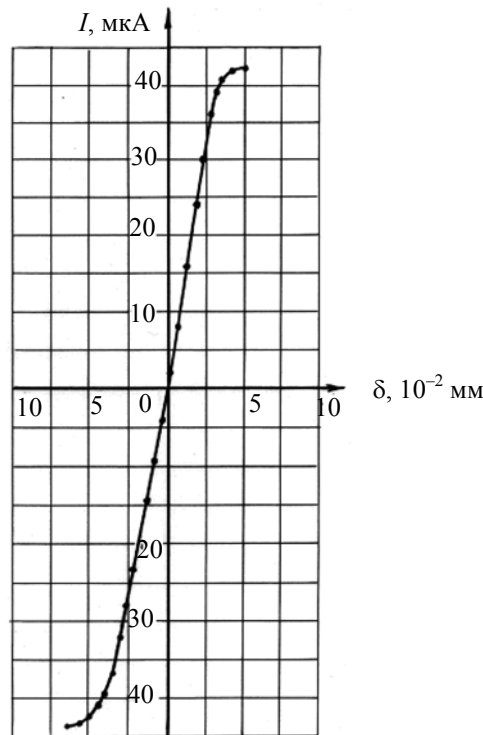


Рис. 4

Крутизна, или чувствительность, ОЭПП рассчитывается следующим образом:

$$S_{\delta} = \Delta I / \Delta \delta = 1250 \text{ мкА/мм},$$

а цена деления шкалы нуль-индикатора равна 0,0008 мм/мкА.

Пусть абсолютная погрешность фиксирования стрелы прогиба УЭ ОЭПП $\Delta f' = 0,0008$ мм, тогда при $f=1$ мм составляющая относительной погрешности измерительного устройства по стреле изгиба равна

$$\eta'_f = \Delta f' / f \cdot 100 = 0,08 \text{ \%}.$$

Полученное значение η'_f необходимо суммировать со второй составляющей. Так как абсолютная погрешность плоскопараллельной концевой меры длины $\Delta f''$, соответствующая размеру 1 мм для второго разряда, равна 0,0001 мм, то

$$\eta''_f = \Delta f'' / f \cdot 100 = 0,01 \text{ \%}.$$

Таким образом, полная относительная погрешность задания f оптоэлектронным преобразователем положения прогиба УЭ на подвижном основании равна

$$\eta_f = \eta'_f + \eta''_f = 0,09 \text{ \%}.$$

На основании полученных в работе результатов можно сделать следующие выводы:

1) ОЭПП на подвижном интерфейсе обеспечивает бесконтактный метод фиксации стрелы прогиба УЭ при минимальных размерах оптико-информационной системы;

2) работа ОЭПП на модулированном потоке излучения ИК-части спектра позволяет избежать влияния на уровень полезного сигнала посторонних источников излучения и низкочастотных шумов;

3) ОЭПП на квадрантном фотодиоде позволяет, в принципе, довести разрешающую способность системы по перемещению стрелы прогиба УЭ прибора до 0,01 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биндюк В. В. Метод определения жесткости упругих элементов // Тр. ЛИТМО. Расчет и проектирование приборов точной механики. 1977. Вып. 91. С. 27—32.
2. Попов Е. П. Теория и расчет гибких упругих стержней. М.: Наука, 1986. 296 с.
3. Панков Э. Д., Тимофеев А. Н. Основные направления работ по совершенствованию оптико-электронных систем для контроля смещений объектов или их элементов // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43, № 1—2. С. 100—103.
4. Берг А., Дин П. Светодиоды. М.: Мир, 1979.
5. Айвазова Л. С. и др. Четырехэлементные позиционно-чувствительные фотодиоды // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. Киев: Наукова думка, 1966.
6. Ишанин Г. Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1986. 176 с.

Сведения об авторе

Владимир Владимирович Биндюк — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: bvvspb@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
29.02.12 г.