

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gabor D. The smoothing and filtering of two-dimensional images // Progress in Biocybernetics, Amsterdam, 1965.— 2.
2. Лебедев Д. С. Статистическая модель изображения // Иконика: Пространственная фильтрация изображений. Фотографические системы.— М.: Наука, 1970.
3. Лебедев Д. С., Миркин Л. И. Двумерное сглаживание изображений с использованием «составной» модели фрагмента // Иконика: Цифровая голография. Обработка изображений.— М.: Наука, 1975.
4. Попов П. Г., Порядина С. А. Кодирование изображений локальными анизотропными признаками // Оптические и оптико-электронные средства обработки информации.— Л.: ЛФТИ, 1989.
5. Попов П. Г., Порядина С. А., Солнышков А. А. Амплитудно-фазовая коррекция изображений: Тез. докл. // Проблемы создания и практического использования оптических процессоров реального масштаба времени.— Черкассы: КГУ, 1989.

Поступило в редакцию 21 декабря 1989 г.

УДК 531.715 : 681.327

А. А. ТИТОВ
(Москва)

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ГЕТЕРОДИННЫМ МЕТОДОМ

В настоящее время интерференционные методы находят применение для абсолютных измерений положения объекта [1, 2]. Однако при реализации этих методов необходимы двухчастотные лазеры, достаточно сложные оптические и электронные системы, что значительно затрудняет их применение в измерительных устройствах.

В данной работе предложен более простой метод разрешения неоднозначности в определении положения объекта. Сущность метода поясняется рис. 1.

Акустооптический модулятор (АОМ) освещается плоским волновым фронтом. Совместим плоскость XOY системы координат с выходной плоскостью АОМ, ось Z с направлением распространения падающего пучка света, а начало координат расположим в центре пучка. Подадим на АОМ два гармонических сигнала с частотами f_b и $f_b + f_n$, где f_b и $f_b + f_n$ — частоты сигналов на выходах генераторов высокой и низкой частоты соответственно. Пучок света будет дифрагировать на бегущих в АОМ ультразвуковых волнах в плоскости XOZ . Ограничимся рассмотрением дифрагированных пучков плюс первого порядка, так как остальные пучки могут быть отфильтрованы щелью фотоприемника. Тогда амплитуды дифрагированных пучков на выходе АОМ можно представить в виде

$$\begin{aligned} A_1 &= A_0 \exp i[(\omega_{св} + \omega_b)t + kz \cos \Theta_b + kx \sin \Theta_b]; \\ A_2 &= A_0 \exp i[(\omega_{св} + \omega_b + \omega_n)t + kz \cos (\Theta_b + \Theta_n) + kx \sin (\Theta_b + \Theta_n)], \end{aligned} \quad (1)$$

где $k = 2\pi n_b/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны света в вакууме; $\Theta_b \approx \lambda f_b/v_{зв}n_b$; $\Theta_n \approx \lambda f_n/v_{зв}n_n$ — углы дифракции света; n_b — показатель преломления воздуха; $v_{зв}$ — скорость звука в АОМ; A_0 — амплитуда дифрагированного пучка; $\omega_{св}$ — частота света.

Положим, что фотоприемник расположен на расстоянии $Z = L$ от АОМ и смещен в поперечном направлении на $x = c$, углы дифракции малы и $\Theta_b \gg \Theta_n$, а дифрагированные пучки интерферируют в плоскости фотоприемника. Тогда с учетом (1) можно получить выражения для сигнала на выходе фотоприемника, в котором учтен только интерференционный член:

$$\begin{aligned} U &= A_0^2 S_{ФП} l_{щ} \int_{c-l_{щx}/2}^{c+l_{щx}/2} |\exp i[(\omega_{св} + \omega_b)t + kL \cos \Theta_b + kx \sin \Theta_b] + \\ &+ \exp i[(\omega_{св} + \omega_b + \omega_n)t + kL \cos (\Theta_b + \Theta_n) + kx \sin (\Theta_b + \Theta_n)]|^2 dx = \\ &= A_0^2 S_{ФП} S_{щ} \operatorname{sinc} \left[kl_{щx} \sin \frac{\Theta_n}{2} \cos \left(\Theta_b + \frac{\Theta_n}{2} \right) \right] \cos \left[\omega_n t + 2kL \sin \left(\Theta_b + \frac{\Theta_n}{2} \right) \sin \frac{\Theta_n}{2} - \right. \\ &\left. - 2kc \sin \frac{\Theta_n}{2} \cos \left(\Theta_b + \frac{\Theta_n}{2} \right) \right] \approx A_0^2 S_{ФП} S_{щ} \operatorname{sinc} \left(\frac{kl_{щx}}{2} \Theta_n \right) \cos (\omega_n t - \varphi), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\varphi = -k\Theta_n c + k\Theta_n L$; $S_{щ} = l_{щx} l_{щy}$ — размеры щели фотоприемника по координатам x и y ; $S_{ФП}$ — чувствительность фотоприемника.

Фазометр измеряет фазу φ , которая пропорциональна положению фотоприемника. Оценим диапазон и точность измерения положения объекта. При оценке диа-

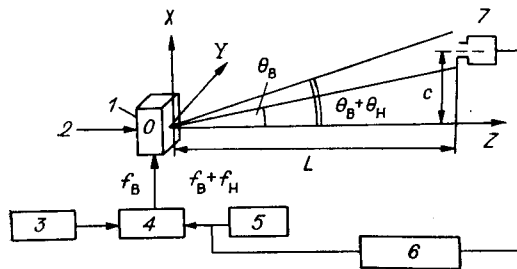


Рис. 1. Схема измерения продольных и поперечных расстояний:

1 — акустооптический модулятор, 2 — свет, 3 — генератор высокой частоты, 4 — электронный блок, 5 — генератор низкой частоты, 6 — фазометр, 7 — фотоприемник

пазона измерения продольного положения необходимо определить, какой максимальный угол $\Theta_{H \max}$ между интерферирующими пучками можно допустить, чтобы происходила интерференция в пределах измерения расстояния L . Это можно найти из следующих двух условий:

1. Выберем ширину области интерференции по координате x не менее половины ширины пучка d_n , тогда из рис. 1 видно, что

$$\Theta_{H \max} \leq d_n / 2L_{\max}. \quad (3)$$

2. Анализируя функцию $\text{sinc}(kl_{\text{щ}x}/2)\Theta_H$, выберем входящие в нее параметры так, чтобы $\text{sinc} \left| \frac{kl_{\text{щ}x}}{2} \Theta_H \right| \geq 0,7$. Отсюда найдем

$$k(l_{\text{щ}x}/2)\Theta_{H \max} \leq \pi/2. \quad (4)$$

Учитывая выражения (3) и (4), получим

$$L_{\max} \leq l_{\text{щ}x} d_n / \lambda. \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что для увеличения L_{\max} нужно увеличивать диаметр дифрагированного пучка. Это можно сделать, если освещающий АОМ коллимированный лазерный пучок будет иметь некоторую расходимость α . Тогда с учетом этой расходимости выражение (5) можно преобразовать к виду

$$L_{\max} \leq \frac{l_{\text{щ}x} d_{n_0}}{\lambda \left(1 - \alpha \frac{l_{\text{щ}x}}{\lambda}\right)}, \quad (6)$$

где d_{n_0} — размер пучка на выходе АОМ. При этом, как показано в [3], условия согласования волновых фронтов не нарушаются. Полагая, например, для реальных устройств $l_{\text{щ}x} = 0,5$ мм, $d_n = 200$ мм, $\lambda = 6,3 \cdot 10^{-4}$ мм, из выражения (6) получим $L_{\max} \leq 160$ м.

Для разрешения неоднозначности в измерении продольных и поперечных координат объекта минимальные частоты нужно выбрать из условия

$$\begin{aligned} \varphi &= kL_{\max}\Theta_H\Theta_B = 2\pi \quad \text{при } c = 0; \\ \varphi &= k\Theta_H c = 2\pi \quad \text{при } L = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

отсюда

$$\begin{aligned} (f_{H \min})_{\text{прод}} &= \frac{v_{\text{зв}}^2 n_B}{c_{\text{max}}}; \\ (f_{H \min})_{\text{поп}} &= \frac{v_{\text{зв}}}{c_{\text{max}}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Выбирая, например, в качестве материала АОМ молибдат свинца с $v_{\text{зв}} = 4 \cdot 10^6$ мм/с; $f_B = 5 \cdot 10^8$ Гц, $c_{\text{max}} = d_n = 200$ мм, с учетом (6) и рассмотренного выше примера имеем

$$(f_{H \min})_{\text{прод}} = 360 \text{ Гц}, \quad (f_{H \min})_{\text{поп}} = 2 \cdot 10^4 \text{ Гц}.$$

Определим максимально возможную частоту $f_{H \max}$ при проведении точных измерений продольных и поперечных координат объекта.

С учетом выражений (2), (3) и (5) получим

$$f_{H \max} \leq v_{\text{зв}} / 2l_{\text{щ}x}. \quad (9)$$

Подставляя в (9) значения указанных выше параметров, найдем $f_{H \max} \leq 4 \cdot 10^6$ Гц. Оценим точность измерений. При этом возможны два режима измерения: грубый (для разрешения неоднозначности) и точный. Частоту f_H можно выбрать для соответствующего режима из (8) или (9). Рассмотрим сначала точный режим измере-

Рис. 2. Результаты эксперимента (точки)

ней. Выразим из (2) L и c при $f_H = f_{H \max}$:

$$L = \frac{v_{зв}^2 n_B \Phi}{2\pi \lambda f_{H \max} f_B} \quad \text{при } c = 0; \quad (10)$$

$$c = \frac{\Phi v_{зв}}{2\pi f_{H \max}} \quad \text{при } L = 0.$$

Для нахождения влияния ошибок от каждого параметра на точность измерения воспользуемся известным выражением

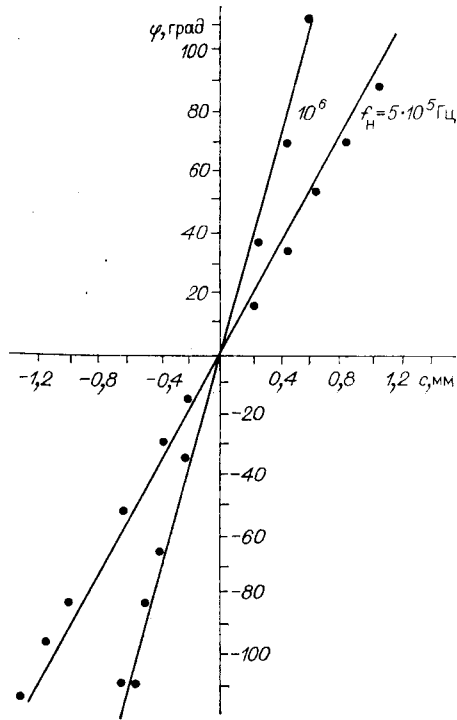
$$\Delta = \frac{\partial f}{\partial p} \Delta p = s \Delta p, \quad (11)$$

где s — коэффициент влияния ошибок; p — один из входящих в выражение (11) параметров. Оценим входящие в выражения (1) погрешности отдельных параметров. Для современных фазометров погрешность измерения фазы не превосходит 1° , т. е. $\Delta \varphi = 1^\circ$. Относительная погрешность изменения длины волны $\Delta \lambda / \lambda = (2 \div 6) \cdot 10^{-7}$, показателя преломления воздуха $\Delta n_B = 1 \times 10^{-7} \div 10^{-6}$, относительная погрешность изменения частоты генераторов $\Delta f / f = 10^{-4}$. Погрешность от изменения скорости звука в модуляторе можно найти, если воспользоваться выражением для скорости звука из [4]:

$$v_{зв} = [n_0 + \beta(t - 20^\circ)]^2 \sqrt{p^2 / m \rho}, \quad (12)$$

где n_0 — показатель преломления среды модулятора при $t = 20^\circ \text{C}$; m — коэффициент акустооптической эффективности; ρ — плотность среды; p — упругооптическая постоянная; β — приращение показателя преломления.

Из выражения (12) видно, что на скорость звука основное влияние оказывает изменение температуры среды. Дифференцируя (12) по t и находя из полученного



Параметр	Коэффициенты влияния ошибок и их значения		Ошибки	
	Продольная координата	Поперечная координата	Продольная координата (мм)	Поперечная координата (мм)
Фаза φ	$\frac{v_{зв}^2 n_B}{2\pi \lambda f_{H \max} f_B} = 0,03$	$\frac{v_{зв}}{2\pi f_H} = 2,8 \cdot 10^{-3}$	0,032	$2,8 \cdot 10^{-3}$
Скорость звука $v_{зв}$	$\frac{v_{зв}^2 n_B \Phi}{\pi \lambda f_{H \max} f_B} = 3,6 \cdot 10^{-6}$	$\frac{\Phi}{2\pi f_H} = 2,5 \cdot 10^{-7}$	10^{-3}	$4 \cdot 10^{-5}$
Длина волны λ	$\frac{\Phi v_{зв}^2 n_B}{2\pi f_{H \max} f_B \lambda^2} = 2 \cdot 10^{-4}$	—	$2,4 \cdot 10^{-6}$	—
Низкая частота f_H	$\frac{\Phi v_{зв}^2 n_B}{2\pi \lambda f_B f_{H \max}^2} = 3,2 \cdot 10^{-6}$	$\frac{\Phi v_{зв}}{2\pi f_H} = 2,5 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}
Высокая частота f_B	$\frac{\Phi v_{зв}^2 n_B}{2\pi \lambda f_B^2 f_{H \max}} = 2,6 \cdot 10^{-12}$	—	$1,3 \cdot 10^{-7}$	—
Показатель преломления n_B	$\frac{\Phi v_{зв}^2}{2\pi \lambda f_{H \max} f_B} = 0,7$	—	$10^{-6} - 10^{-7}$	—

выражения ошибку $\Delta v_{зв}$, можно получить

$$\Delta v_{зв} = \frac{2\beta\Delta t}{n_0} v_{зв t=20^\circ} \quad (13)$$

Полагая $\beta = 2 \cdot 10^{-6}$, $v_{зв} = 4 \cdot 10^6$ мм/с и $\Delta t = 40^\circ \text{C}$, $n_0 \approx 2$, из (13) имеем $\Delta v_{зв} = 320$ мм/с.

С учетом (10) и (11) определены коэффициенты влияния ошибок для приведенных выше значений параметров и их ошибок. Результаты расчетов сведены в таблицу. Наибольшее значение на точность измерений оказывает погрешность, вносимая фазометром. Влияние остальных погрешностей незначительно.

Оценим теперь погрешность при грубом режиме измерений при максимальном расстоянии до объекта $L_{\max} = 160$ м. Подставив найденное выше для указанного расстояния значение $(f_{\text{н min}})_{\text{прод}} = 360$ Гц в выражения, приведенные в таблице, получим ошибку $\Delta L_{\max} \approx 0,41$ м.

Таким образом, для продольных перемещений ошибка измерений согласно расчету может изменяться посредством перестройки частоты $f_{\text{н}}$ от 0,932 до 410 мм при $L \leq 160$ м.

Для проверки метода были проведены экспериментальные исследования. В схеме эксперимента в качестве датчика положения использовался уголкового отражатель, установленный на подвижном столике. Пучок от отражателя направлялся на фотоприемник, расположенный рядом с АОМ. АОМ освещался коллиматорным лазерным пучком. Измерялось поперечное смещение уголкового отражателя с помощью индикатора с ценой деления 10^{-2} мм.

В эксперименте использовался АОМ с параметрами $f_{\text{в}} = 2 \cdot 10^7$ Гц, $v_{зв} = 4 \times 10^6$ мм/с. Низкая частота выбиралась равной 10^5 и $5 \cdot 10^5$ Гц. Изменение фазы φ при поперечном смещении отражателя с рассчитывалось по выражению (10) при указанных выше параметрах. Результаты расчета и эксперимента приведены на рис. 2. Таким образом, данный способ может быть использован для разрешения неоднозначности при определении положения объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gillard C. W., Buholz N. E., Rider D. W. Absolute distance interferometry // Opt. Eng.— 1981.— 20, N 1.— P. 129.
2. Голубев А. Н. Анализ возможностей создания интерферометра для измерения расстояний без перемещения отражателя // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.— 1987.— № 2.
3. Протопопов В. В., Устинов Н. Д. Лазерное гетеродинамирование.— М.: Наука, 1985.
4. Ребрин Ю. К. Управление оптическим лучом в пространстве.— М.: Сов. радио, 1977.

Поступило в редакцию 31 мая 1988 г.

УДК 621.865.8.005 : 681.586

О. С. БОРОВИК, Г. И. НЕРУШ, П. И. НЕЧУНАЕВ,
В. И. СЫРЯМКИН, В. С. ТИТОВ, А. А. ФОМИН
(Томск)

ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

В настоящее время уделяется большое внимание разработке систем технического зрения (СТЗ), предназначенных для автоматизации контроля различных изделий электронной промышленности (полупроводниковых кристаллов, пластин и т. п.). Одним из путей реализации СТЗ является создание зрительных систем на основе универсальных микроЭВМ [1—3].

В статье описывается СТЗ, предназначенная для автоматического контроля соответствия формы (конструкции) полупроводниковых изделий (кристалла или пластины) эталону (сортировка изделий на годные или дефектные по анализу его видимой поверхности).

Функциональная схема СТЗ приведена на рис. 1. СТЗ состоит из следующих устройств: 1 — оптического микроскопа (М), 2 — телевизионной камеры (ТК), 3 — буферного запоминающего устройства (БЗУ), 4 — пере-

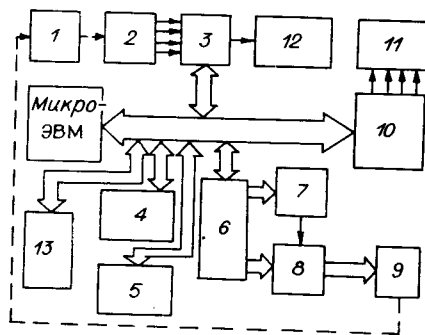


Рис. 1