

УДК 620.22

## **ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОЙ ВЫСОТЫ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ ПО МЕТОДУ РАССЕЯННОГО СВЕТА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

**Шалуцаев С. В., Ковдратенко В. И., Морозов В. П.**

*Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франци-  
ска Скорины», Гомель, Беларусь,  
[vpmorozov@gsu.unibel.by](mailto:vpmorozov@gsu.unibel.by)*

Поверхности деталей машин, элементы оптических приборов и поверхности подложек для интегральных схем, полученные различными методами, имеют профиль не только разной высоты, но и различной геометрической формы, что оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства поверхности. Контроль шероховатости (чистоты) поверхности производится либо качественно (сравнение с эталоном), либо количественным методом, с помощью специальных приборов, в качестве которых применяются профилометры, профилографы, двойные микроскопы, микроинтерферометры, приборы светового сечения и др. [1]. В силу необходимости достоверного и оперативного контроля качества обработки поверхности в условиях массового производства, необходимости автоматизации процесса измерений, специфики многих технологических процессов (процессы в агрессивных средах, в вакууме) бесспорное преимущество имеют бесконтактные оптические методы контроля шероховатости поверхности.

Известно, что для определения шероховатости сверхгладких полированных поверхностей можно применять способ, основанный на измерении интенсивности излучения, отраженного от поверхности исследуемого образца в зеркальном направлении и в направлении, отличном от зеркального. Оценку среднеквадратического отклонения высот микронеровностей производят по отношению измеренных интенсивностей [2]. Очевидно, что при наличии на контролируемой поверхности анизотропии обработки точность и достоверность оценки шероховатости оказываются низкими, поскольку при наличии анизотропии существенно изменяется интенсивность зеркальной и отличной от зеркальной компонент отраженного излучения. Результаты измерения отношения интенсивностей существенно зависят от ориентации контролируемой поверхности относительно фотоприемников. Различия в диапазонах измерений (достигающих для сверхгладких поверхностей величины более порядка) порождают проблему согласования чувствительности фотоприемников. Поскольку отношение интенсивностей зеркальной и отличной от зеркальной компонент зависит от статистики поверхности, то при неизвестной статистике необходимо производить калибровку устройства.

Известны приборы, основанные на регистрации интенсивности излучения на нулевой пространственной частоте, по величине которой определяют высоту микронеровностей [3]. Однако интенсивность излучения на нулевой пространственной частоте в значительной степени зависит от химического состава, физического состояния поверхности, наличия анизотропии обработки, статистики распределения неоднородностей поверхности, что существенно снижает точность и достоверность определения шероховатости поверхности, особенно, такого её параметра, как среднеквадратичное отклонение профиля.

Такой способ, как регистрация интенсивности отраженного излучения на нулевой пространственной частоте путем измерения интенсивности зеркальной компоненты отраженного излучения, и, одновременно, интегральной интенсивности отраженного излучения на заданной пространственной частоте с помощью световода с фотоприемником и световодного конуса с фотоприемником, можно рассматривать как попытку определения шероховатости поверхности по отношению интегральной интенсивности излучения на заданной пространственной частоте  $\omega$  при аксиальной (осевой) симметрии спектра пространственных частот к интенсивности излучения на нулевой пространственной частоте. Однако в такой схеме лучи, соответствующие одной и той же пространственной частоте, но приходящие из разных точек контролируемой поверхности, пересекают фокальную плоскость регистрации под различными углами и, следовательно, при использовании интегрирующего конуса аппаратная функция прибора зависит от вида спектра и не может быть учтена при измерениях. При определении средней квадратичной высоты микронеровностей анизотропных поверхностей влияние "мертвых зон" между фотоэлементами на достоверность измерения интегральной интенсивности на заданной пространственной частоте возрастает, и вместо высоты микронеровностей выявляется дефект обработки поверхности. Кроме того, при произвольном статистическом распределении неоднородностей поверхности необходимо проведение калибровки устройства.

Для повышения достоверности и точности определения среднеквадратичной высоты микронеровностей, определения статистического распределения неоднородностей поверхности, возможности определения среднеквадратичной высоты микронеровностей поверхностей с неизвестным характером статистики неоднородностей поверхностей без дополнительной калибровки прибора был разработан следующий метод.

Для определения шероховатости поверхности ее освещают (зондируют) под прямым углом к ней пучком когерентного света, который, после отражения от поверхности, разлагают в спектр пространственных частот. Отраженное поверхностью излучение пропускают через оптическую сфероконическую систему, выступающую в роли аксиального интегратора. Это дает возможность регистрировать интенсивность излучения на оптической оси, а, следовательно, с помощью одного фотоприемника найти интегральную интенсивность излучения на произвольной пространственной частоте. Среднюю квадратичную высоту микронеровностей определяют по отношению интегральной интенсивности отраженного излучения на произвольной пространственной частоте к интенсивности отраженного излучения на нулевой пространственной частоте.

В качестве освещающих пучков когерентного света используют параллельные пучки, нормально падающие на исследуемую поверхность. Регистрацию интенсивности отраженного и разложенного в спектр пространственных частот излучения осуществляют фотоприемником, расположенным на оптической оси. Регистрация произвольной компоненты одним фотоприемником на оси оптической системы обеспечивается тем, что сфероконическая система преобразует распределение мощности светового поля рассеянного под определенным углом к оси системы в соответствующее распределение суммы спектральных компонент по оси системы. В зависимости от положения на оптической оси фотоприемник регистрирует интегральную интенсивность произвольной пространственной частоты (в том числе и нулевую пространственную частоту).

Рассмотрим, какие преобразования осуществляет сфероконическая система с точки зрения волновой оптики. Пусть в плоскости  $U'(\xi)$  находится сфероконическая система (рис. 1).

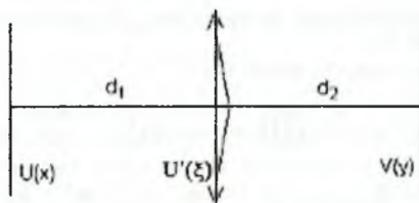


Рис. 1.

Фазовое пропускание сфероконической системы имеет вид

$$T(\xi) = \exp\left\{-ik\left(\frac{\xi^2}{2f} + \alpha|\xi|\right)\right\}.$$

Пусть плоскость  $P(x)$  расположена перпендикулярно оси системы на расстоянии  $d_1$  от линзы. Поле в плоскости  $P(x)$  описывается функцией  $U(x)$  и связано с полем  $U'(\xi)$  преобразованием Френеля следующим образом:

$$U'(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(x) \exp\left\{\frac{ik}{2d_1}(\xi - x)^2\right\} dx.$$

Пусть плоскость  $P(y)$  расположена перпендикулярно оси системы на расстоянии  $d_2$  от линзы. Поле в плоскости  $P(y)$  описывается функцией  $V(y)$  и связано с полем  $U'(\xi)$  преобразованием Френеля следующим образом:

$$V(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} U'(\xi) T(\xi) \exp\left\{\frac{ik}{2d_2}(y - \xi)^2\right\} d\xi.$$

Подставляя значения  $U'(\xi)$ ,  $T(\xi)$ , учитывая свойства определенного интеграла, учтя, что  $\int_{-\infty}^0 U(x) dx = -\int_0^{+\infty} U(x) dx$ , и сделав замену  $\Delta = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} - \frac{1}{f}$ , после ряда вычислений получим

$$I = V(y) = \sqrt{\frac{\pi}{2k\Delta}} \exp(i\frac{\pi}{4}) \left\{ \exp\left[\frac{ik}{2\Delta}\left(\frac{y^2}{d_1 d_2} - \frac{y^2}{d_2 f} + \frac{2y\alpha}{d_2} - \alpha^2\right)\right] \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} U(x) \exp\left[\frac{ik}{\Delta}\left[2x^2\left(\frac{1}{d_1 d_2} - \frac{1}{d_1 f}\right) - x\left(\frac{y}{d_1 d_2} - \frac{\alpha}{d_1}\right)\right]\right] dx + \exp\left[\frac{ik}{2\Delta}\left(\frac{y^2}{d_1 d_2}\right)\right] \right\} \\ \left\{ + \exp\left[\frac{ik}{2\Delta}\left(\frac{y^2}{d_1 d_2} - \frac{y^2}{d_2 f} - \frac{2y\alpha}{d_2} - \alpha^2\right)\right] \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} U(x) \exp\left[\frac{ik}{\Delta}\left[2x^2\left(\frac{1}{d_1 d_2} - \frac{1}{d_1 f}\right) - x\left(\frac{y}{d_1 d_2} + \frac{\alpha}{d_1}\right)\right]\right] dx \right\}. \quad (*)$$

Рассмотрим, какое преобразование осуществляет сфероконическая система при условии, что  $d_1 = f$ ,  $d_2 \neq f$  и  $\Delta = 1/d_2$ .

При этих условиях выражение (\*) примет вид

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{\pi d_2}{2k}} \exp\left(i\frac{\pi}{4}\right) \exp\left[ik\left(2y\alpha - \alpha^2 d_2\right)\right] \int_{-\infty}^{\infty} U(x) \exp\left\{i2kx^2\left(\frac{1}{f} - \frac{d_2}{f^2}\right) - x\left(\frac{y}{f} - \frac{\alpha d_2}{f}\right)\right\} dx = \\ &= \sqrt{\frac{\pi d_2}{2k}} \exp\left[i\left(\frac{k\alpha^2 d_2}{2} - \frac{\pi}{4}\right)\right] \left[ \exp(ik\alpha y) \hat{F}_{\omega+\omega_0(d_2)} \left\{ U(x) \exp\left(\frac{ik}{f}\left[1 - \frac{d_2}{f}\right]x^2\right) \right\} + \right. \\ &\quad \left. + \exp(-ik\alpha y) \hat{F}_{\omega-\omega_0(d_2)} \left\{ U(x) \exp\left(\frac{ik}{f}\left[1 - \frac{d_2}{f}\right]x^2\right) \right\} \right]. \end{aligned}$$

Если  $x \ll f$ , то в этом случае выражением типа формулы Френеля под оператором Фурье можно пренебречь, и поле в плоскости объекта с точностью до соответствующих фазовых множителей будет представлять собой сумму спектральных компонент симметрично расположенных относительно оси системы со сдвигом на  $\omega_0$ .

Рассмотрим спектр мощности поля.

$$\begin{aligned} N(\omega) &= \left[ \exp\left(\frac{iky\alpha'}{f}\right) G[\omega - \omega_0] + \exp\left(\frac{-iky\alpha'}{f}\right) G[\omega + \omega_0] \right]^* \\ &\quad * \left[ \exp\left(\frac{-iky\alpha'}{f}\right) G^*[\omega - \omega_0] + \exp\left(\frac{iky\alpha'}{f}\right) G^*[\omega + \omega_0] \right] = \\ &= |G[\omega - \omega_0]|^2 + \exp\left(\frac{-2iky\alpha'}{f}\right) G(\omega + \omega_0) G^*(\omega - \omega_0) + \\ &\quad + \exp\left(\frac{2iky\alpha'}{f}\right) G^*(\omega + \omega_0) G(\omega - \omega_0) + |G(\omega + \omega_0)|^2 \end{aligned}$$

Очевидно, что при  $y = 0$  это выражение можно представить в виде

$$N(\omega) = \left[ |G(\omega - \omega_0) + G(\omega + \omega_0)| \right]^2,$$

которое представляет собой выражение для мощности суммы спектральных компонент, симметрично расположенных относительно оси системы со сдвигом на  $\omega_0$ .

Обобщая данное выражение на трехмерный случай, можно прийти к выводу, что распределение поля на оси системы представляет собой сумму спектральных компонент, соответствующих мощности светового поля, рассеянного под определенным углом к оси системы, определяемым из выражения  $\omega_0 = k_0 \sin \varphi$ , где  $\varphi$  – угол между волновым вектором дифрагированной компоненты и осью системы.

Таким образом, система играет роль конического интегратора. Так как  $\omega_0$  является функцией положения плоскости регистрации  $d_2$ , то перемещением точки регистрации вдоль оси системы можно производить измерение углового спектра поля с одновременным интегрированием по азимутальному углу.

Следует отметить, что интенсивность на произвольной и нулевой пространственной частоте регистрируется одним и тем же фотоприемником, расположенным на оптической оси системы. Нормальное падение освещающего пучка обеспечивает аксиальность спектров и возможность регистрации спектра поля на оптической оси системы. При наличии анизотропии обработки поверхности положение плоскости регистра-

ции может быть выбрано таким образом, что пространственные частоты, соответствующие анизотропии, не совпадут с  $\omega_0$ , что позволяет избежать погрешности измерения, обусловленной анизотропией обработки.

Указанные факторы способствуют получению достоверной и более точной оценки интенсивности отраженного излучения на нулевой пространственной частоте и интегральной интенсивности на заданной пространственной частоте.

Оценка среднеквадратичной высоты микронеровностей производится по отношению интегральной интенсивности отраженного излучения на заданной пространственной частоте  $N(\omega_0)$  к интегральной интенсивности отраженного излучения на нулевой пространственной частоте  $N_3$ . Однако, явная форма зависимости среднеквадратичной

высоты микронеровностей  $\sigma\left(\frac{N(\omega_0)}{N_3}\right)$  может быть определена только для определенной

статистики распределения неоднородностей поверхности. При известной статистике распределения неоднородностей поверхности можно произвести работы в статическом варианте, устанавливая пространственную частоту регистрации, в наибольшей степени соответствующую диапазону микронеровностей и наличию анизотропии обработки. В динамическом режиме, автоматически изменяя положение плоскости регистрации, измеряется спектральное распределение энергии в рассеянном поле с интегрированием по азимутальному углу, что позволяет оценить статистику распределения неоднородностей поверхности и определить зависимость  $\sigma\left(\frac{N(\omega_0)}{N_3}\right)$ .

Указанный фактор позволяет повысить точность и достоверность определения среднеквадратичной высоты микронеровностей, в том числе, для поверхностей с неивственной статистикой распределения неоднородностей.

На рис. 2 изображена оптическая схема устройства для определения шероховатости поверхности и статистического распределения неоднородностей поверхности, реализующая предлагаемый метод.

Устройство содержит лазер 1, расположенные по ходу лазерного излучения плоское полупрозрачное зеркало 3, установленное под углом в  $45^\circ$  к оптической оси, оптическую сфероконическую систему (аксикон) 4, диафрагму 5 и фотоприемник 6 с узлом перемещения 7, электрически связанный с измерительным блоком (на рисунке не показан).

Устройство содержит лазер 1, расположенные по ходу лазерного излучения плоское полупрозрачное зеркало 3, установленное под углом в  $45^\circ$  к оптической оси, оптическую сфероконическую систему (аксикон) 4, диафрагму 5 и фотоприемник 6 с узлом перемещения 7, электрически связанный с измерительным блоком (на рисунке не показан).

Исследуемая поверхность 2 устанавливается перпендикулярно ходу луча лазера в передней фокальной плоскости аксикона 4, а фотоприемник 6 установлен на оптической оси и имеет возможность перемещаться вдоль оптической оси с помощью узла перемещения 7. Перед фотоприемником 6 установлена диафрагма 5 в форме отверстия. Полупрозрачное зеркало 3 установлено под углом  $45^\circ$  к оптической оси, проходящей через лазер 1, и под углом  $45^\circ$  к оптической оси, проходящей через аксикон 4, диафрагму 5 и фотоприемник 6. Фотоприемник 6 с установленной перед ним диафрагмой 5 перемещается вдоль оптической оси с помощью узла перемещения между положениями плоскости регистрации соответствующими нулевой и выбранной пространственной частоте.

Устройство работает следующим образом. Лазерный пучок от лазера 1 полупрозрачным плоским зеркалом 3 направляется по нормали на контролируемую поверхность 2. Отраженное от поверхности 2 излучение попадает на оптическую сфероконическую систему, которая играет роль конического интегратора, т.е. распределение поля на оси системы представляет собой сумму спектральных компонент, соответствующих мощности светового поля рассеянного под определенным углом к оси системы. Под управлением команд измерительного блока фотоприемник 6 с установленной перед

ним диафрагмой 5 перемещается вдоль оптической оси с помощью узла перемещения 7. В статическом режиме работы фотоприемник 6 с установленной перед ним диафрагмой 5 устанавливается последовательно в плоскость регистрации соответствующую нулевой и выбранной пространственной частоте. Интегральные интенсивности  $N_3$  и  $N(\omega_0)$ , соответствующие нулевой и выбранной пространственной частоте регистрируется измерительным блоком. В динамическом режиме работы фотоприемник 6 с установленной перед ним диафрагмой 5 непрерывно перемещается вдоль оптической оси между плоскостями регистрации соответствующими нулевой и выбранной пространственной частоте. Интегральная интенсивность  $N(\omega)$ , соответствующая пространственной частоте  $\omega$  непрерывно регистрируется измерительным блоком.

Измерительный блок определяет отношение  $\frac{N(\omega_0)}{N_3}$ , а по нему - величину среднеквадратичной высоты микронеровностей  $\sigma$ .

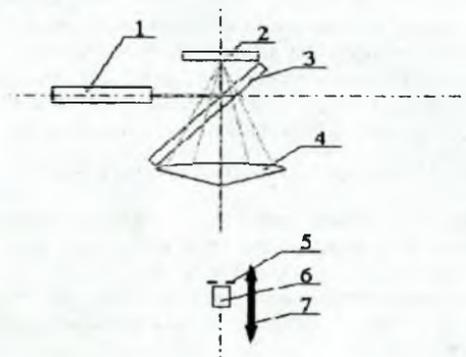


Рис. 2.

Благодаря оптической сфероконической системе 4, происходит непрерывное аналоговое интегрирование и регистрация интенсивности отраженного излучения на произвольной частоте  $\omega$ , причем измерение компонент излучения на произвольной пространственной частоте осуществляют одним и тем же фотоприемником 6.

Таким образом, в результате реализации указанных особенностей регистрации появляется возможность определения статистики неоднородности поверхности и выбора произвольной пространственной частоты, в наибольшей степени соответствующей диапазону микронеровностей и наличию анизотропии обработки, что позволяет значительно снизить погрешность измерения по сравнению с известными решениями и расширить применяемость оптических методов определения шероховатости поверхности.

#### Список литературы

1. Новичихина Л.И. Техническое черчение: Справ. пособие. - Мн.: Выш. школа, 1983. - 222 с.
2. Авторское свидетельство СССР №815492, МКИ G 01B1/30, опубликовано 1981 г.
3. Авторское свидетельство Японии №58-13842, G 01B1/06, G 01B21/41, опубл. 16.03.83.