

УВЕЛИЧЕНИЕ ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЕНИЙ ВЫСОТЫ РЕЛЬЕФА В ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ ПРОФИЛОМЕТРЕ

Игнат Александрович Выхристюк

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, зав. лабораторией, тел. (383)306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Родион Владимирович Куликов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, научный сотрудник тел. (383)306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Евгений Владимирович Сысоев

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Предложены методы увеличения диапазона измерений высоты рельефа поверхности интерференционным профилометром. Методы основаны на использовании нескольких источников света с различными длинами волн. Экспериментально показано, что диапазон измерений при использовании двух длин волн увеличился не менее чем в 5 раз, а при использовании трех длин волн – не менее чем в 7 раз при сохранении разрешающей способности измерений.

Ключевые слова: интерференционная профилометрия, низкокогерентная интерферометрия, фазосдвигающие методы, диапазон измерений.

INCREASING THE RANGE OF MEASUREMENTS OF PROFILE HEIGHT IN THE INTERFERENCE PROFILOMETER

Ignat A. Vykhristyuk

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Head of Laboratory, phone: (383)306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Rodion V. Kulikov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Researcher, phone: (383)306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Evgeny V. Sysoev

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Ph. D., Leading Researcher, phone: (383)306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Methods for increasing the measurement range of the height of surface profile by the interference profilometer are proposed. The methods are based on using of multiple light sources with different wavelengths. It was shown experimentally that the measurement range increased at least 5 times due to using of two wavelengths, and at least 7 times due to using three wavelengths, while maintaining the resolution of the measurements.

Key words: interference profilometry, low-coherence interferometry, phase-shifting methods, range of measurements.

Введение

Измерения, выполняемые интерференционным профилометром, связаны с регистрацией интерферограмм и последующим вычислением карты высот профиля поверхности, находящейся в зоне измерения микроскопа. В случае если в интерферометре микроскопа используется один источник света, для фазосдвигающей интерферометрии [1–3] существует ограничение однозначного определения высоты рельефа. Это связано с тем, что интерференционный сигнал имеет периодический характер изменения интенсивности, поэтому его фаза Φ однозначно определяется в интервале одного периода [4].

Для того чтобы величина интерференционного сигнала изменилась от максимума до минимума, необходимо, чтобы разница оптического пути между интерферирующими волнами света изменилась на четверть эффективной длины волны света ($\lambda/4$). Отсюда, вычисление высоты рельефа поверхности выполняется по формуле $H = \lambda \cdot \Phi / 4\pi$, и, соответственно, диапазон измеряемых высот ограничен значениями $\pm\lambda/4$.

Использование нескольких источников света, с отличными от первого длинами волн, позволяет преодолеть это ограничение [5–11]. Например, для двух источников света с длинами волн λ_1 и λ_2 соответственно, выполняется два измерения одного и того же участка поверхности. При этом диапазон измерений увеличивается в Λ/λ_1 и Λ/λ_2 раз относительно измерений на соответствующей длине волны [12–14]. Λ представляет собой синтезированную длину волны [15], значение которой может быть вычислено при помощи выражения: $\Lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$ [16].

Надо отметить, что чем ближе значения используемых длин волн, тем больше увеличивается диапазон измерений, но и тем выше требования к погрешности измерений с использованием λ_1 и λ_2 [17].

Реальное значение высоты рельефа вычисляется по формуле

$$H = n \cdot \lambda / 4 + h, \quad (1)$$

где n – целое число полудлин волн, h – измеренная на длине волны λ высота.

В случае двухволнового измерения имеется два значения высоты $H_1 = H(\lambda_1)$ и $H_2 = H(\lambda_2)$ одного и того участка поверхности. Для того чтобы получить H_1 и H_2 необходимо выполнить интерференционные измерения высот $h_1 = h(\lambda_1)$ и $h_2 = h(\lambda_2)$ и найти целые значения $n_1 = n(\lambda_1)$ и $n_2 = n(\lambda_2)$.

Целью данной работы является расширение диапазона достоверных интерференционных измерений высоты рельефа при использовании нескольких источников света без снижения разрешающей способности и масштабирования ошибки. В работе предлагается два метода увеличения диапазона измерений – метод дифференциального рельефа и трехволновой метод, приводятся резуль-

таты экспериментальной апробации предложенных методов и результаты сравнительных измерений.

Метод дифференциального рельефа

Предлагаемый метод дифференциального рельефа основан на использовании разности двух результатов h_1 и h_2 измерения одного и того же рельефа, полученных при использовании источников с различными длинами волн λ_1 и λ_2 , соответственно (далее считается, что $\lambda_1 > \lambda_2$). Для определения значений n_1 и n_2 не используется перебор по всему диапазону. Используя (1) и принимая во внимание, что $H_1 \approx H_2$, достаточно рассмотреть два случая:

$$1) \quad n_1 = n_2 \quad \Rightarrow \quad n_1 = n_2 = 2 \cdot \delta h / \delta \lambda;$$

$$2) \quad |n_2| = |n_1| + 1:$$

$$- \text{ при } \delta h < -\varepsilon: n_1 = n_2 + 1 \quad \Rightarrow \quad n_1 = 2 \cdot (\delta h - \lambda_2/2) / \delta \lambda, n_2 = 2 \cdot (\delta h - \lambda_1/2) / \delta \lambda;$$

$$(n_1 \leq 0, n_2 < 0)$$

$$- \text{ при } \delta h > +\varepsilon: n_1 = n_2 - 1 \quad \Rightarrow \quad n_1 = 2 \cdot (\delta h + \lambda_2/2) / \delta \lambda, n_2 = 2 \cdot (\delta h + \lambda_1/2) / \delta \lambda;$$

$$(n_1 \geq 0, n_2 > 0)$$

– вариант $|\delta h| \leq \varepsilon$ соответствует случаю 1,

где ε – пороговое значение, определяемое погрешностью измерения высоты рельефа h_1 и h_2 , $\delta h = h_1 - h_2$, дифференциальный рельеф, $\delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, а n_1 и n_2 округляются до ближайшего целого, причем, чем ближе n_1 и n_2 к истинным значениям, тем ближе их значения к целым числам.

Выбор одного из двух рассмотренных случаев, осуществляется по принципу минимизации модуля разности H_1 и H_2 . Результирующая высота рельефа H_d вычисляется, как среднее арифметическое:

$$H_d = (H_1 + H_2) / 2.$$

Использование предложенного метода позволяет увеличить диапазон однозначного определения высоты рельефа до $\pm \Lambda / 4$, при этом сохранив разрешающую способность одноволновых измерений.

Трехволновой метод

Еще одним вариантом увеличения диапазона измерений является добавление дополнительных источников света. Авторы предполагают, что если погрешность измерений не позволяет выбрать два источника с достаточно близкими значениями эффективных длин волн, чтобы расширить диапазон на необ-

ходимую величину, можно подобрать три или более источника света с такими значениями длин волн, что измеренные фазы сигналов будут однозначно определять высоту в требуемом диапазоне.

В результате измерения рельефа поверхности с использованием трех источников света имеется набор соответствующих высот h_1 , h_2 и h_3 . С их помощью, аналогично (1), требуется найти набор высот:

$$H_i = n_i \cdot \lambda_i / 2 + h_i, \quad i \in \{1, 2, 3\}, \quad (2)$$

где H_i – измеренное с помощью i -го источника света значение H после устранения фазовой неоднозначности, отличающееся от H только погрешностью измерения, n_i – целое количество соответствующих полудлин волн, добавляемых для устранения неоднозначности. Также будем считать, что $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$.

Для определения правильных значений n_i используется перебор значений n_3 в диапазоне $\pm N_3$ (диапазон перебора и, соответственно, диапазон измерений зависит от значений длин волн и максимальной возможной ошибки измерения; алгоритм приведен далее). Используя (2), для каждого значения n_3 находим H_3 , а значения n_1 и n_2 вычисляются, исходя из предположения равенства всех H_i :

$$n_i = 2(H_3 - h_i) / \lambda_i, \quad i \in \{1, 2\},$$

при этом значения n_1 и n_2 округляются до ближайшего целого.

Условием определения правильных значений n_i , $i \in \{1, 2, 3\}$ считаем минимизацию суммы модулей парных разностей H_i :

$$|H_1 - H_2| + |H_1 - H_3| + |H_2 - H_3| \rightarrow \min, \quad (3)$$

а результирующий рельеф вычисляется, как среднее арифметическое H_i , $i \in \{1, 2, 3\}$.

Как и в случае метода дифференциального рельефа, разрешающая способность трехволновых измерений остается на уровне одноволновых, так как исходные результаты h_i измерений не масштабируются.

Определение диапазона трехволновых измерений

Диапазон измерений при трехволновом методе предлагается вычислять, исходя из значений длин волн λ_i , $i \in \{1, 2, 3\}$, и максимальной погрешности измерения ε . Рассмотрим поведение значения h_i в зависимости от высоты H . При отсутствии погрешности измерений ($\varepsilon = 0$) график значений h_i представляет собой «пилу» с периодом $\lambda_i/2$ и амплитудой $\lambda_i/4$. Разность высот h_1 и h_2 (равно как и любых двух других) будет постоянна на интервалах, лежащих между скачками фазы этих функций. Аналогично сумма модулей из (3), которую мы минимизируем, будет постоянна на интервалах, лежащих между скачками всех трех функций h_i .

Требуется найти диапазон, внутри которого возникнет неоднозначность определения n_i , т. е. когда значения n_i , полученные из (2), дадут сумму (3), не отличимую, с точностью до погрешности, от начального интервала ($n_i = 0$). Это возможно, когда максимальная разность в сумме (3) станет меньше 4ϵ , т. е. если мы не сможем отличить лучшую разность рельефов от допустимой при $n_i = 0$.

Алгоритм расчета диапазона измерений имеет следующий вид:

Шаг 1. Инициализация: начальные значения $n_i, i \in \{1, 2, 3\}$, равны 0.

Шаг 2. Поиск начала следующего интервала: находим значение m , для которого $n_m \lambda_m / 2 + \lambda_m / 4 = \min \{n_i \lambda_i / 2 + \lambda_i / 4 \mid i \in \{1, 2, 3\}\}$; определяем начальную высоту интервала $H_m = n_m \lambda_m / 2 + \lambda_m / 4$; значение n_m инкрементируем на 1.

Шаг 3. Определение максимального модуля разности: вычисляем $h_i = H_m - n_i \lambda_i / 2, i \in \{1, 2, 3\}$; определяем $\Delta = \max \{|h_i - h_j| \mid i, j \in \{1, 2, 3\}, i < j\}$; если $\Delta \leq 4\epsilon$ или H_m больше минимальной длины когерентности, то переходим к шагу 4, иначе переходим к шагу 2.

Шаг 4. Диапазон определен: диапазон измерений H_m ; диапазон перебора $N_3 = n_3 - 1$, если $m = 3$, иначе $N_3 = n_3$.

Проведенные по описанному алгоритму вычисления показали, что величина диапазона измерений рельефа поверхности в трехволновом режиме ($\lambda_1 = 629,39$ нм, $\lambda_2 = 534,47$ нм и $\lambda_3 = 467,18$ нм) при ошибке измерения до $\pm 4,8$ нм значительно превышает диапазон в двухволновом режиме. Диапазон измерений ограничивается длиной когерентности, минимальной среди используемых источников излучения. В нашем случае для применяемых в натуральных экспериментах светодиодов эта величина имеет значение ~ 7 мкм. При ошибке от $\pm 4,8$ нм до $\pm 15,4$ нм величина диапазона измерений в трехволновом режиме соответствует диапазону двухволнового режима ($\lambda_1 = 534,47$ нм, $\lambda_2 = 467,18$ нм), вычисляемого по формуле эквивалентной длины волны Λ . Когда ошибка измерений составляет величину больше $\pm 15,4$ нм, диапазон трехволнового режима становится меньше $\pm \Lambda / 4$.

Экспериментальная проверка

Натурные эксперименты выполнялись на интерференционном микроскопе МНП-1 [18] с тремя источниками света. Для ввода излучения в интерферометр использовалось «смешанное» световолокно.

В качестве источников излучения использовалось три светодиода с эффективными длинами волн $\lambda_1 = 629,39$ нм, $\lambda_2 = 534,47$ нм и $\lambda_3 = 467,18$ нм. Определение значений эффективных длин волн светодиодов при использовании их в оптической системе интерферометра выполнялось при помощи процедуры привязки длины волны каждого светодиода к близкой длине волны лазерного излучения [19].

Измерения нанорельефа поверхности производились по методу частичного сканирования коррелограмм [20]. Для каждого из источников света в диапазоне сканирования порядка 1 мкм регистрировалось 256 интерферограмм. На каж-

дом шаге процесса сканирования регистрировалось три интерферограммы, каждая для соответствующего источника света. В отличие от однократных измерений, выполненных отдельно друг от друга, для каждой длины волны, измерение, выполненное таким образом, позволило избежать возможных ошибок, связанных с отсутствием повторяемости (гистерезисом) пьезокерамического актюатора и изменениями внешних условий.

Представленные далее результаты измерений на МНП-1 с применением предложенных методов в двухволновом и трехволновом режимах сопровождаются результатами сравнительных измерений, выполненных на коммерческом интерференционном микроскопе.

На рис. 1 приведены результаты измерений образца, на поверхности которого находится ступенька с плавным изменением высоты профиля. Высота профиля, измеренная на МНП-1 в двухволновом режиме методом дифференциального рельефа (рис. 1, *а*) равна ~ 851 нм. Значение высоты, измеренное на коммерческом микроскопе (рис. 1, *б*), равно ~ 854 нм.

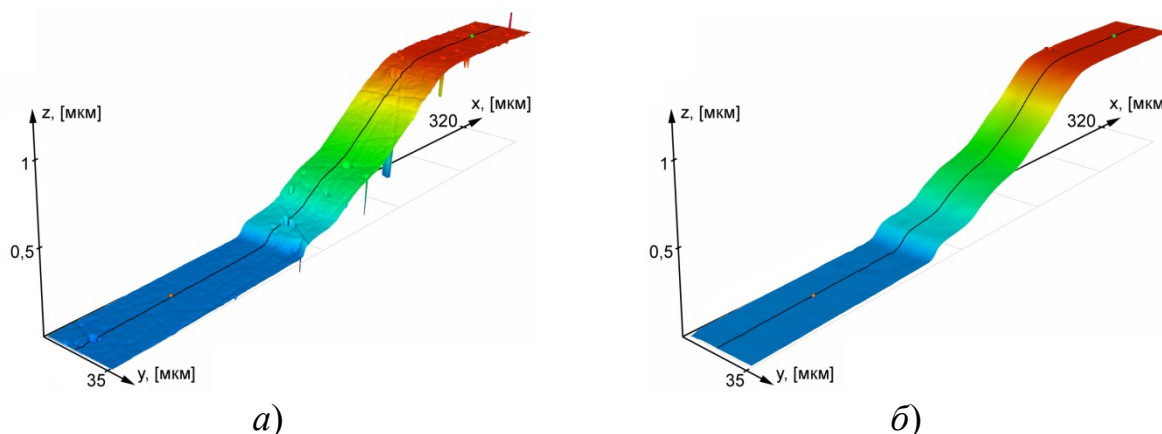


Рис. 1. Результаты измерений образца с плавным изменением высоты профиля (высота структуры $\sim 0,9$ мкм):

а) результат измерения выполненного на МНП-1: *б)* результат измерения выполненного на коммерческом микроскопе

На рельефе, полученном с помощью МНП-1 (рис. 1, *а*), различима текстура поверхности (царапины, вмятины, поры). Рис. 1, *б* демонстрирует более сглаженный рельеф, что говорит о более высокой разрешающей способности измерений с использованием предложенного метода.

На рис. 2 представлены результаты измерений образца, содержащего ступенчатую структуру с резким краем. Результат измерения, выполненного на МНП-1 в трехволновом режиме, показан на рис. 2, *а*. Высота профиля ступенчатой структуры, определенная по распределению высот, равна $1\,265,9$ нм. На рис. 2, *б* показан результат измерения на коммерческом интерференционном микроскопе. Высота профиля в данном случае равна $1\,275,6$ нм.

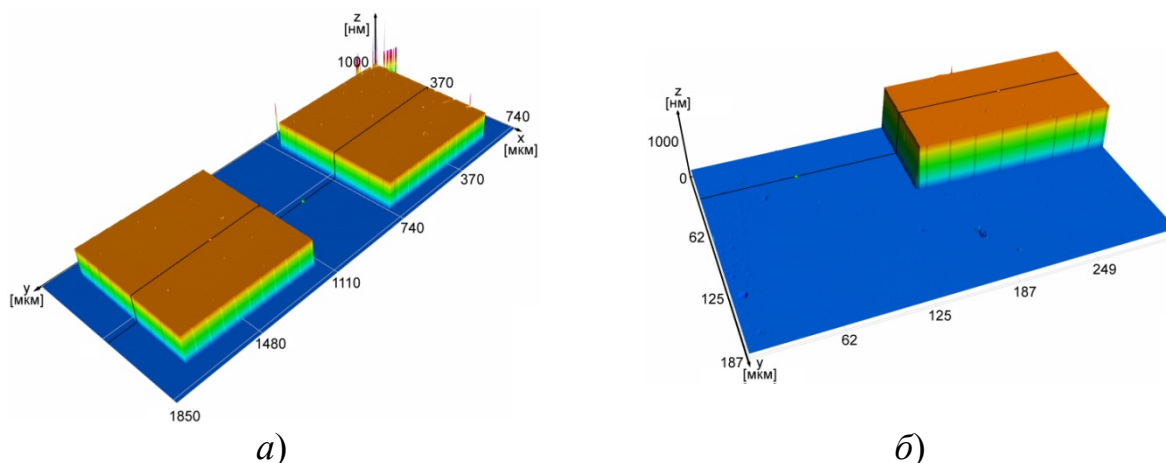


Рис. 2. Результаты измерений образца с высотой профиля структуры высотой $\sim 1,2$ мкм:

а) результат измерения выполненного на МНП-1; б) результат измерения выполненного на коммерческом микроскопе

Заключение

Представленные результаты измерений показывают, что использование предложенных методов позволило увеличить диапазон измерений высоты рельефа интерференционным профилометром в несколько раз. Для метода дифференциального рельефа диапазон достоверного измерения высоты рельефа увеличился с ± 157 нм до ± 993 нм, т. е. более чем в 5 раз. Использование трехволнового метода позволило измерить рельеф поверхности с перепадом высот $\sim 1,2$ мкм, что говорит о том, что диапазон измерений увеличился более чем в 7 раз. При этом разрешающая способность измерений не ухудшилась.

Приведенные результаты сравнительных измерений подтверждают правильность разрешения неоднозначности фазового сдвига предложенными методами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. O'Mahony C., Hill M., Brunet M., Duane R., Mathewson A. Characterization of micromechanical structures using white-light interferometry // Meas. Sci. Technol. – 2003. – 14. – P. 1807–1814.
2. Guo T., Ma L., Chen J.P., Fu X., Hu X.T. MEMS surface characterization based on white light phase shifting interferometry // Opt. Eng. – 2011. – 50. – P. 053606.
3. Sysoev E. V., Kosolobov S. S., Kulikov R. V., Latyshev A. V., Sitnikov S. V., Vykhristyuk I. A. Interferometric Surface Relief Measurements with Subnano/Picometer Height Resolution // Measurement Science Review. – 2017. – 17, N. 5. – P. 213–218.
4. Leach R. Optical Measurement of Surface Topography. Springer, 2011. – P. 167–174.
5. U. Paul Kumar, Basanta Bhaduri, M. P. Kothiyal, N. Krishna Mohan Two-wavelength micro-interferometry for 3-D surface profiling // Optics and Lasers in Engineering. – 2009. – 47. – P. 223–229.

6. Meiners-Hagen K., Schödel R., Pollinger F., Abou-Zeid A. Multi-Wavelength Interferometry for Length Measurements Using Diode Lasers // Measurement science review. – 2009. – 9, N. 1. – P. 16–26.
7. Abdelsalam D. G., Kim D. Two-wavelength in-line phase-shifting interferometry based on polarizing separation for accurate surface profiling // Applied Optics. – 2011. – 50, Is. 33. – P. 6153–6161.
8. Tong Guo, Feng Li, Jinping Chen, Xing Fu, Xiaotang Hu Multi-wavelength phase-shifting interferometry for micro-structures measurement based on color image processing in white light interference // Optics and Lasers in Engineering. – 2016. – 82. – P. 41–47.
9. Jiaxiang Xiong, Liyun Zhong, Shengde Liu, Xiang Qiu, Yunfei Zhou, Jindong Tian, Xiaoxu Lu Improved phase retrieval method of dual-wavelength interferometry based on a shorter synthetic-wavelength // Opt. Express. – 2017. – 25, N. 7. – P. 7181–7191.
10. U. Paul Kumar, Wang Haifeng, N. Krishna Mohan, M. P. Kothiyal White light interferometry for surface profiling with a colour CCD // Optics and Lasers in Engineering. – 2012. – 50. – P. 1084–1088.
11. Hao Han, Yawei Wang, Yuanyuan Xu, Ying Ji, Bing Xie & Qibao Shen A new phase retrieval algorithm with pure generalized three-step phase-shifting under matrix norm processing // Journal of Modern Optics. – 2019. – 66:11, 1252-1258, DOI: 10.1080/09500340.2019.1611967.
12. Yukihiro Ishii and Ribun Onodera Two-wavelength laser-diode interferometry that uses phase-shifting techniques // Opt. Lett. – 1991. – 16. – P. 1523–1525.
13. Yeou-Yen Cheng and James C. Wyant Two-wavelength phase shifting interferometry // Appl. Opt. – 1984. – Vol. 23, N. 24. – P. 4539–4543.
14. Xiang Qiu, Liyun Zhong, Jiaxiang Xiong, Yunfei Zhou, Jindong Tian, Dong Li, and Xiaoxu Lu Phase retrieval based on temporal and spatial hybrid matching in simultaneous phase-shifting dual-wavelength interferometry // Opt. Express. – 2016. – 24. – P. 12776–12787.
15. Peter de Groot and John McGarvey Chirped synthetic-wavelength interferometry // Opt. Lett. – 1992. – 17. – P. 1626–1628.
16. Katherine Creath Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry // Appl. Opt. – 1987. – 26. – P. 2810–2816.
17. Limei Song, Xiaoxiao Dong, Jiangtao Xi, Yanguang Yu, Chaokui Yang A new phase unwrapping algorithm based on three wavelength phase shift profilometry method // Optics & Laser Technology. – 2013. – 45. – P. 319–329.
18. Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В., Поташников А. К., Разум В. А., Степнов Л. М. Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. – 2010. – 46, № 2. – С. 119–128.
19. Определение эффективной длины волны источника света в интерференционном профилометре / Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, В. В. Широков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 39–43.
20. Сысоев Е. В. Метод частичного сканирования коррелограмм для измерения микро-рельефа поверхностей // Автометрия. – 2007. – 43, № 1. – С. 107–115.

© И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, Е. В. Сысоев, 2019