

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВАРИАЦИИ АЛЛАНА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Б.С. Лунин¹

М.А. Басараб²

Н.С. Коннова²

И.С. Строганов²

luninboris@yandex.ru

basarab@bmstu.ru

nkonnova@bmstu.ru

stroganovis@bmstu.ru

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Метод вариации Аллана эффективно используется для исследования стабильности генераторов частоты, шумовых характеристик динамических процессов различной физической природы, представленных в виде временных рядов. В то же время методы нелинейной динамики, в частности фрактальный анализ, применяют как при обработке временных рядов, так и для исследования нерегулярностей профилей или поверхностей. По аналогии с этим проведена оценка возможности использования метода вариации Аллана для анализа изменений поверхности твердого тела в ходе химической и тепловой обработки. Применение вариации Аллана позволяет количественно оценить составляющие шероховатости, соответствующие поверхностным дефектам определенного размера. Исследованы изменения поверхности шлифованных и полированных пластин из кварцевого стекла, а также оплавленных прутков при химическом растворении поверхностного слоя. Представленные графики и вычисленные вариации Аллана для профилей различных поверхностей наглядно показывают, что изменение стандартного отклонения рельефа поверхности при химическом травлении кварцевых пластин и прутков связано с размером поверхностных дефектов. Полученные результаты исследования поверхности хорошо согласуются с оценками, выполненными методом фрактального анализа. Применение метода вариации Аллана

Ключевые слова

Вариация Аллана, рельеф поверхности, поверхностный дефект, шероховатость, химическая обработка

Введение. Шероховатость поверхности — один из наиболее существенных параметров при производстве различных оптических деталей, кварцевых резонаторов и микроэлектронных компонентов. Рельеф поверхности твердого тела формируется в процессе разнообразных обработок: механической, химической и термической. Основные параметры и методы измерения шероховатости поверхности хорошо известны [1] и приведены в стандартах*. Чаще всего используют такие параметры, как средняя шероховатость R_a — среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины; шероховатость R_z — сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин; наибольшая высота профиля R_{max} . Кроме того, используют среднеквадратическую шероховатость, среднеквадратический наклон поверхности, а также функции распределения микронеровностей по высотам и углу [2, 3]. Эти параметры характеризуют рельеф поверхности, однако не позволяют детально отследить изменение рельефа поверхности при ее обработке различными методами, поскольку поверхностные дефекты различных размеров по-разному взаимодействуют с химическими средами, абразивными материалами и т. д. С этой точки зрения статистические методы анализа поверхности могут оказаться весьма полезными. Существуют фрактальные методы описания поверхности, начиная с молекулярного уровня [4, 5], использующие различные процедуры фрактального анализа профилей шероховатости обработанных поверхностей и вычисления фрактального эквивалента среднеквадратичной шероховатости. Эти методы успешно работают на реальных поверхностях полированных, притертых, фрезерованных и точеных образцов [6].

Для разделения поверхностных дефектов разных размеров также может быть использован метод вариации Аллана, который в течение многих лет успешно применяется для анализа случайных процессов [7–9]. Вариация Аллана является измерением стабильности показаний различных устройств, также известна как квадрат среднеквадратического относительного двухвыборочного отклонения частоты, или двухвыборочная дисперсия. В общем случае это вариация разности значений двух относительных

* ГОСТ 2789–73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. М., Стандартинформ, 2013.

показаний исследуемого прибора. В настоящее время, кроме классической вариации Аллана, применяют ее различные обобщения [10–12]. Имеется связь метода вариации Аллана со сплайн-аппроксимацией [13], кратно-масштабным анализом на основе вейвлетов Хаара [14], методами нелинейной динамики [14, 15].

Цель работы — разработка нового подхода к анализу нерегулярных профилей поверхностей по аналогии с анализом случайных временных процессов методом вариации Аллана.

Классическая непрерывная вариация Аллана. Рассмотрим основные теоретические предпосылки для применения метода вариации Аллана в анализе шероховатости профилей поверхностей.

Классическая непрерывная вариация Аллана описывается в терминах непрерывных во времени сигналов с нулевым средним значением $y(x)$. Осуществим формальный переход от временного сигнала y к пространственной функции высоты профиля поверхности h и, соответственно, от временной координаты t к пространственной продольной координате x . Здесь и далее под термином «сигнал» по-прежнему будем предполагать высоту профиля $h(x)$.

Автокорреляционная функция такого профиля-сигнала имеет вид

$$R_h(\tau) = E[h(x)h(x + \tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T h(x)h(x + \tau)dx,$$

где E — оператор математического ожидания.

Для стационарного профиля-сигнала истинная дисперсия $\sigma_h^2 = R_h(0)$ и является аналогом средней мощности процесса.

Связь между двусторонней спектральной плотностью мощности (СПМ) сигнала и его автокорреляционной функцией основана на преобразовании Фурье:

$$S_h^{\text{II}}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_h(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau, \quad R_h(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_h^{\text{II}}(f) e^{i2\pi f\tau} df.$$

На практике вместо двусторонней СПМ чаще используется односторонняя:

$$S_h(f) = \begin{cases} 2S_h^{\text{II}}(f) & f \geq 0, \\ 0 & f < 0. \end{cases}$$

Спектральная плотность мощности модельных сигналов степенного спектра

$$S_h(f) = A_\alpha f^\alpha, \quad (1)$$

где A_α — постоянная амплитуда; α — параметр, который может принимать различные целые значения (как положительные, так и отрицательные) для разных типов неоднородностей.

Истинная дисперсия не определена для целого $\alpha < 0$, поскольку следующий интеграл расходится:

$$\sigma_y^2 = \int_0^\infty S_h(f) df = \int_0^\infty A_\alpha f^\alpha df.$$

В связи с этим для разных типов шумов применяют другие оценки нестациональности частоты, особенно для значений $\alpha = -4-2$.

Для описания профилей, определяемых компонентами СПМ на низких частотах, необходимо исследовать дисперсию сигнала $h(x)$, усредненного за интервал τ , с использованием фильтра скользящего среднего G с импульсной характеристикой

$$g(x, \tau) = \frac{1}{\tau} \perp_\tau \left(x - \frac{\tau}{2} \right),$$

где

$$\perp_\tau(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq \tau/2, \\ 0 & |x| > \tau/2. \end{cases}$$

Таким образом, усредненный профиль определяется как оператор свертки

$$z(x, \tau) = g(x, \tau) * h(x) = \frac{1}{\tau} \int_{x-\tau}^x h(x) dx.$$

Частотная характеристика фильтра скользящего среднего $G(f) = \text{sinc}(\pi\tau f)e^{i\pi\tau f}$, где

$$\text{sinc } f \equiv \frac{\sin f}{f}.$$

Спектральная плотность мощности усредненной функции профиля

$$S_z(f) = |G(f)|^2 S_h(f).$$

Следовательно, истинная дисперсия усредненного профиля может быть выражена как

$$\sigma_z^2 = \int_0^\infty \text{sinc}^2(\pi\tau f) S_h(f) df. \quad (2)$$

Дисперсия (2) также не определена для степенного закона (1) при $\alpha < 0$, поэтому необходимо ввести дополнительный фильтр D последовательно с G . Дисперсия результирующего выходного сигнала $u(x, \tau)$ имеет следующий спектр:

$$\sigma_u^2 = A_\alpha \int_0^\infty \text{sinc}^2(\pi\tau f) |D(f)|^2 f^\alpha df. \quad (3)$$

Для сходимости интеграла (3) АЧХ нового фильтра должна иметь вид $D(f) = f^\beta$ с $\beta > -\alpha/2$ при асимптотическом стремлении f к нулю.

Самый распространенный способ получить такие фильтры — использовать несколько непрерывных производных сигнала $z(x, \tau)$ во времени, поскольку производная во временной области соответствует умножению на f^2 в области СПМ:

$$u^{(n)}(x, \tau) \equiv \frac{d^n z(x, \tau)}{dx^n}. \quad (4)$$

Соответствующая СПМ

$$S_u^{(n)}(f) = (2\pi f)^{2n} S_z(f) = (2\pi f)^{2n} \text{sinc}^2(\pi\tau f) S_h(f).$$

Дисперсия результирующего сигнала

$$\sigma_u^2(\tau; n) = \int_0^\infty (2\pi f)^{2n} \text{sinc}^2(\pi\tau f) S_h(f) df.$$

Реализовать вывод (4) на практике невозможно, так как соответствующая частотная характеристика должна иметь линейные характеристики для всех частот. Поэтому следует использовать фильтры D , аппроксимирующие частотную характеристику вблизи нулевой частоты. Простейшее семейство разностных фильтров n -го порядка имеет импульсную характеристику, определяемую выражением

$$d^{(n)}(\tau; n) = \sum_{k=0}^n (-1)^k C_n^k \delta(x - k\tau), \quad (5)$$

где C_n^k — биномиальные коэффициенты,

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!};$$

$\delta(t)$ — дельта-функция Дирака.

Преобразование Фурье (5) дает импульсную характеристику фильтра:

$$D^{(n)}(f) = (2i)^n \sin^n(\pi\tau f) e^{-i\pi n\tau f}.$$

Выход фильтра

$$u^{(n)}(x, \tau) = \frac{1}{c_n} \left[d^{(n)}(x, \tau) g(x, \tau) \right] h(t),$$

где $c_n = \sqrt{C_{2n}^n}$ — коэффициент нормализации, используемый для сохранения неизменной дисперсии белого шума, произведенной фильтром.

Дисперсия $u^{(n)}(t, \tau)$ может быть записана как

$$\begin{aligned} \sigma_u^2(\tau; n) &= \frac{1}{c_n^2} \int_0^\infty |D^{(n)}(f)G(f)| S_h(f) df = \\ &= \frac{2^{2n}}{c_n^2} \int_0^\infty \sin^{2n}(2\pi f) \sin^2(\pi\tau f) S_h(f) df. \end{aligned} \quad (6)$$

Эта дисперсия сходится при $\alpha > -(n+2)$. Для обеспечения сходимости $\sigma_u^2(\tau; n)$ при положительных значениях α верхний предел интегрирования в (6) должен быть ограничен частотой среза.

Комбинация фильтра нижних частот $G(f)$ с фильтром верхних частот $D^{(n)}(f)$ дает полосовой фильтр $\Pi(f)$. Варьируя параметр фильтра τ , получаем банк различных полосовых фильтров. Этот метод аналогичен вейвлет-анализу с несколькими разрешениями.

Большинство известных дисперсий стабильности генерируются уравнением (6) [10–12]. При этом исследуемая дисперсия Аллана (AVAR) соответствует случаю $n = 1$:

$$\sigma_u^2(\tau; 1) = 2 \int_0^\infty \sin^2(2\pi f) \sin^2(\pi\tau f) S_h(f) df.$$

AVAR определяется для степенного спектра с $-2 \leq \alpha \leq 0$. Для $\alpha > 0$ необходимо учитывать высокую частоту среза f_{high} , а для степенного закона с $\alpha = -3$ низкую частоту среза f_{low} . Вариация Аллана также называется двухвыборочной дисперсией в отличие от одновыборочной истинной дисперсии σ_h^2 . Импульсная характеристика дисперсионного фильтра Аллана представляет собой базисную функцию вейвлета Хаара.

Дискретная вариация Аллана в задаче анализа профилей. Рассмотрим описанный выше подход для анализа шероховатости поверхности твердого тела, когда высота рельефа, заданная в виде дискретного набора измерений, отклоняется случайным образом от средней линии при движении вдоль выбранной координаты. Пусть имеется массив из N измерений высот поверхности h_k , сделанных вдоль координаты x через равные промежутки τ .

Дискретная вариация Аллана представляет собой вариацию разности значений двух измеренных относительных высот h_{k+1} и h_k профиля, причем $h_k = h(x_0 + k\tau)$. Величина τ характеризует линейный размер поверхностного дефекта. Вариация Аллана $\sigma_A^2(h; \tau)$ зависит от τ и выражает среднеквадратичное значение всех разностей отсчетов, разделенных промежутком τ за весь интервал измерений T :

$$\sigma_A(h; \tau) = \sqrt{\frac{1}{2M} \sum_{i=0}^{M-1} (Y_{i+1} - Y_i)^2},$$

$$\text{где } M = \lceil T / \tau \rceil - 1; Y_i = \frac{1}{M} \sum_{k=i}^{i+M-1} y_k, y_k = \frac{h_{k+1} - h_k}{\tau_0}.$$

Следовательно, дискретная пространственная вариация Аллана — это вариация M пар измерений, выполненных в точках x и $x + \tau$.

Рассчитывая значение вариации $\sigma_A(h; \tau)$ на различных временных масштабах τ и построив график зависимости $\sigma_A(h; \tau)$ от τ , можно выполнить линейную регрессию полученных точек и по наклону аппроксимирующей кривой выдвинуть предположение о типе шума в сигнале. Вычисление вариации Аллана может быть интерпретировано как прохождение входных данных через перестраиваемый полосовой размерный фильтр; меняя x , можно выделить и количественно оценить составляющие шероховатости, соответствующие поверхностным дефектам определенного размера.

Экспериментальная часть. Исследованы изменения поверхности шлифованных и полированных пластин из кварцевого стекла, а также оплавленных прутков при химическом растворении поверхностного слоя. Водный травильный раствор содержал серную кислоту (60 %), фторид-ионы с концентрацией 3,6 % и поверхностно-активное вещество (ПАВ) — перфторпелларгоновую кислоту (0,002 %); промывка проводилась в серной кислоте (40 %) и воде. Использование ПАВ при травлении и промывке образцов позволило лучше очистить поверхность кварцевого стекла от продуктов гидролиза поликремниевых кислот. Толщину удаленного слоя определяли по убыли массы Δm : $l = \Delta m / (\rho S)$, где ρ — плотность кварцевого стекла; S — площадь обрабатываемой поверхности.

Исследовано также влияние отжига, который проводился на воздухе при температуре 910 °С в течение примерно 700 ч. Рельеф поверхности измерялся с использованием лазерного профилометра *Olympus Lext* с ша-

гом 0,125 мкм. На каждом этапе измерения регистрировалось 7–10 профилей поверхности в произвольно выбранных направлениях, длина базовой линии 0,15 мм. Вычисление вариации Аллана выполняли с помощью программы *Alavar 5.2* [16], полученные результаты вычислений осреднялись по всем измеренным для выбранной поверхности профилям.

Результаты и обсуждение. Типичные профили поверхности шлифованной пластинки из кварцевого стекла в исходном состоянии и после проведения нескольких циклов химического травления приведены на рис. 1. Заметно, что качественный характер рельефа поверхности существенно изменился: концентрация мелкомасштабных поверхностных

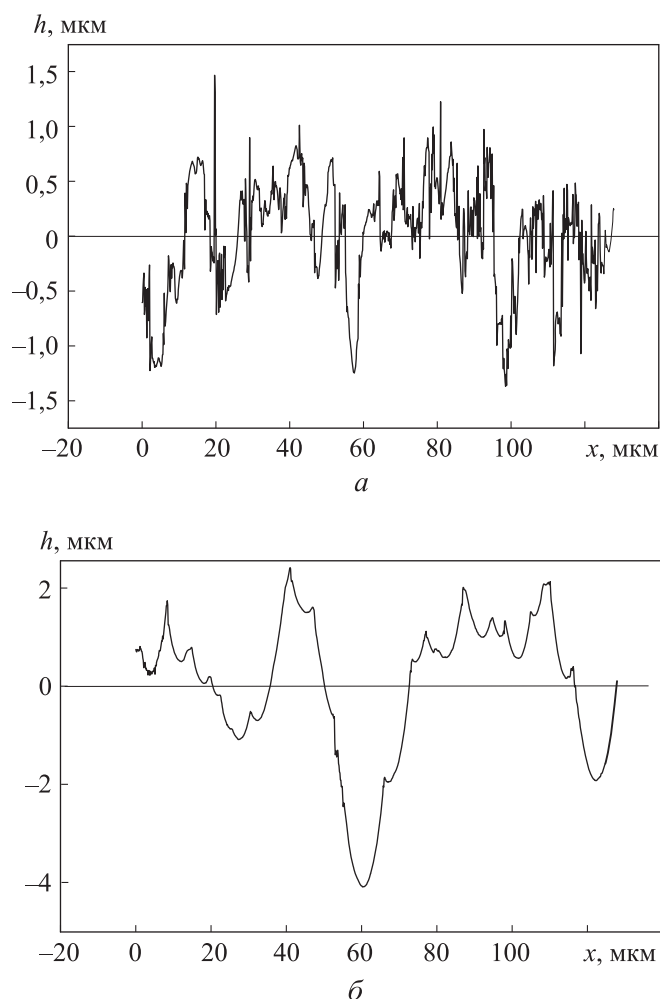


Рис. 1. Профили поверхности шлифованной пластинки из кварцевого стекла в исходном состоянии (*а*) и после проведения нескольких циклов химического травления (*б*) (удаления поверхностного слоя толщиной 19,1 мкм)

дефектов уменьшилась, а крупномасштабных — увеличилась. Средняя шероховатость поверхности R_a возросла от 0,5 (рис. 1, а) до 1,5 мкм (рис. 1, б), однако очевидно, что этот параметр не описывает всех изменений поверхности в ходе химической обработки.

Применение метода вариации Аллана позволяет детально описать процесс трансформации поверхности. Результаты вычисления вариации Аллана для профиля поверхности этой же пластинки после каждого этапа химической обработки представлены на рис. 2. По оси абсцисс указан размер группы осреднения M , характеризующий в рассматриваемом случае линейный размер поверхностных дефектов. Стандартное отклонение рельефа поверхности в ходе химического травления действительно изменяется по-разному для различных по размеру поверхностных дефектов. Однако, в отличие от качественной характеристики рельефа поверхности (см. рис. 1), эти данные (см. рис. 2) позволяют получить количественный результат. Изменение стандартного отклонения рельефа поверхности этого же образца в зависимости от толщины удаленного слоя для различных по размеру дефектов поверхности приведено на рис. 3. Изменение стандартного отклонения рельефа поверхности этого образца при химическом травлении однозначно связано с размером поверхностных дефектов. Так, при удалении нарушенного слоя толщиной около 19 мкм, σ_A изменяется незначительно для дефектов размером примерно 2 мкм, уменьшается примерно в 3 раза для дефектов размером около 0,125 мкм, увеличивается почти в 2 раза для дефектов больших размеров.

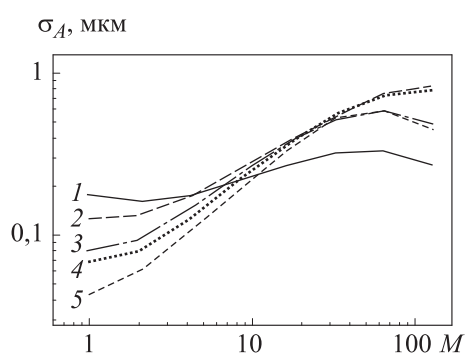


Рис. 2. Результаты вычисления вариации Аллана для кварцевой пластинки с шлифованной поверхностью после нескольких этапов химической обработки:

1 — исходное состояние; 2 — после удаления слоя толщиной 7,3 мкм; 3 — после дополнительного удаления слоя толщиной 3,5 мкм; 4 — после дополнительного удаления слоя толщиной 4,7 мкм; 5 — после дополнительного удаления слоя толщиной 3,6 мкм

Этот вывод также подтверждается исследованием профилей поверхности травленных полированных кварцевых пластинок и оплавленных кварцевых прутков. Шероховатость поверхности этих образцов примерно на два порядка ниже, чем для пластинок со шлифованной поверхно-

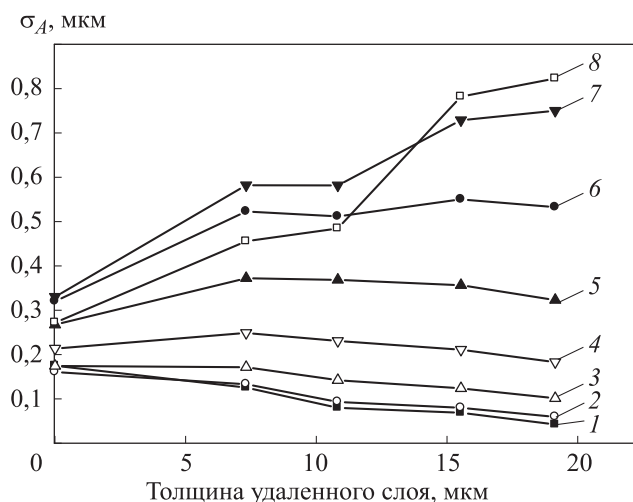


Рис. 3. Изменение стандартного отклонения рельефа поверхности кварцевой пластинки в зависимости от толщины удаленного слоя для поверхностных дефектов размером 0,125 (1), 0,25 (2), 0,5 (3), 1,0 (4), 2,0 (5), 4,0 (6), 8,0 (7) и 16 мкм (8)

стью и при химическом травлении этих образцов стандартное отклонение практически не изменяется в пределах базовой линии. Результаты расчета методом вариации Аллана стандартного отклонения рельефа поверхности различных образцов для поверхностных дефектов размером 8 мкм (рис. 4) подтверждают вывод о том, что шероховатость поверхности с малой высотой рельефа практически не изменяется при химической обработке. Этот эффект вероятно связан с возникновением деформированных зон материала при механической обработке стекла: при шлифовке воздействие кромок зерен абразива приводит не только к скалыванию материала с поверхности, но и к образованию микротрещин и деформированных зон, ориентированных по нормали к обрабатываемой поверхности на значительную глубину. При химическом травлении скорость растворения стекла в этих областях гораздо выше, чем в ненарушенном материале, что и ведет к увеличению высоты рельефа поверхности. С позиции практики применение метода вариации Аллана позволяет оптимизировать режим как механической, так и химической обработки поверхности различных деталей при их изготовлении.

Изменения рельефа поверхности твердого тела могут быть связаны и с другими процессами, например с отжигом, который может стимулировать протекание твердофазных реакций и приводить к формированию на поверхности новой кристаллической фазы. Использован также метод вариации Аллана при исследовании кинетики протекания таких процес-

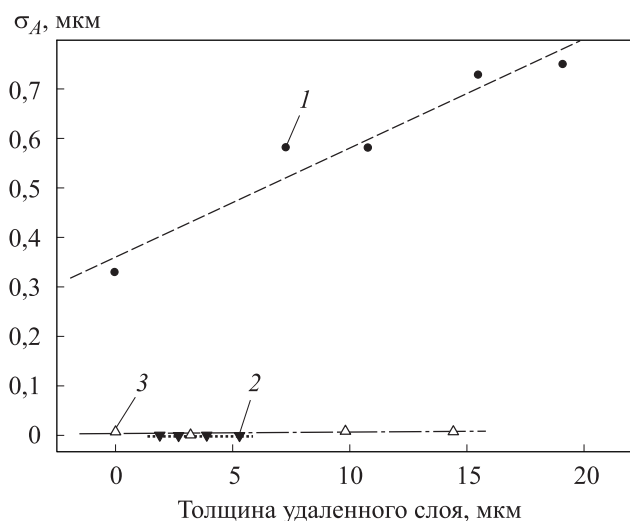


Рис. 4. Изменение стандартного отклонения рельефа поверхности различных образцов при химическом травлении для поверхностных дефектов размером 8 мкм:

1 — кварцевая пластинка с шлифованной поверхностью; 2 — кварцевая пластинка с полированной поверхностью; 3 — оплавленный кварцевый пруток

сов. В эксперименте кварцевая пластинка с полированной поверхностью отжигалась в течение 700 ч при температуре 910 °С, периодически образец извлекался из печи и измерялся рельеф поверхности. После обработки всего массива данных программой *Alavar 5.2* построены временные зависимости стандартного отклонения рельефа поверхности образца для всех размеров дефектов. В качестве примера на рис. 5 показана такая зависимость для дефектов поверхности размером 4 мкм. Полагая в первом приближении линейной зависимость σ_A от времени отжига, для каждого размера дефектов по параметрам линейной регрессии определяли скорость изменения стандартного отклонения $V_R = ds / dt$.

Для приведенного на рис. 5 случая эта скорость составляла $V_R = (1,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$ мкм/ч. Результаты расчета скорости для дефектов поверхности в диапазоне 1...32 мкм приведены на рис. 6.

Расчитанная зависимость имеет выраженный максимум для дефектов размером 2...4 мкм, т. е. поверхностные дефекты такого размера формируются наиболее интенсивно. Физическая интерпретация природы этих дефектов может быть различна, в частности, в этих условиях на поверхности могут формироваться микрокристаллы $H_8Si_8O_{12}$ [6]. Однако однозначная идентификация этих дефектов требует применения других физико-химических методов исследования поверхности твердого тела.

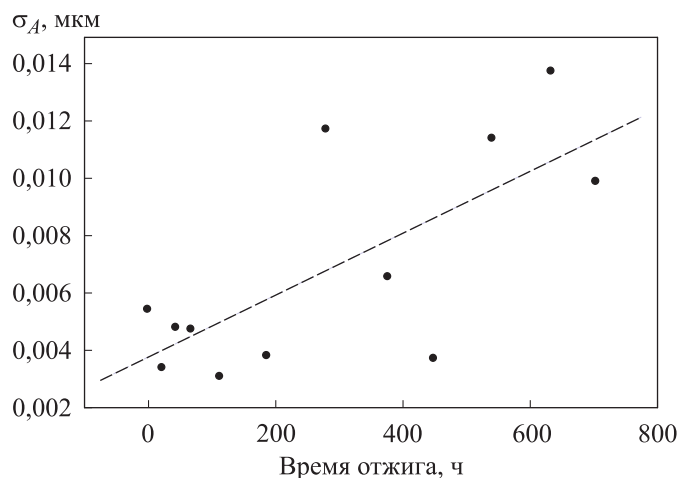


Рис. 5. Изменение стандартного отклонения рельефа поверхности полированной кварцевой пластинки при отжиге для дефектов размером 4 мкм

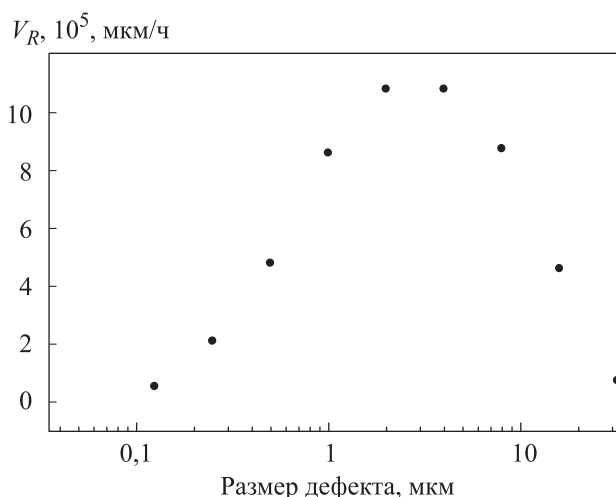


Рис. 6. Изменение стандартного отклонения рельефа полированной поверхности кварцевого стекла при отжиге для дефектов размером 1...32 мкм

Заключение. Предложено использовать метод вариации Аллана, изначально предназначенного для анализа случайных временных процессов, для исследования нерегулярных профилей поверхности твердого тела. Такой подход позволяет с использованием программного обеспечения количественно определить соотношение поверхностных дефектов разных размеров в общей шероховатости и проследить изменение этого соотношения при различных видах обработки поверхности твердого

тела. На примере анализа методом вариации Аллана рельефа поверхности пластинок из кварцевого стекла при их химической обработке продемонстрирована однозначная взаимосвязь изменения стандартного отклонения рельефа поверхности с размером поверхностных дефектов. Предложенный подход существенно расширяет исследовательские возможности при изучении физико-химических процессов, протекающих на поверхности твердого тела.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Patrikar R.M. Modeling and simulation of surface roughness. *Appl. Surf. Sci.*, 2004, vol. 228, iss. 1-4, pp. 213–220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.01.010>
- [2] Айман О. Динамика формирования поверхностной шероховатости при обработке свободным абразивом. Дис. ... канд. техн. наук. СПб., Университет ИТМО, 2005.
- [3] Miller P.E., Suratwala T.I., Wong L.L., et al. The distribution of subsurface damage in fused silica. *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5991, art. 599101-1. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.638821>
- [4] Pfeifer P. Fractal dimension as working tool for surface-roughness problems. *Appl. Surf. Sci.*, 1984, vol. 18, iss. 1-2, pp. 146–164. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-5963\(84\)90042-4](https://doi.org/10.1016/0378-5963(84)90042-4)
- [5] Jahn R., Truckenbrodt H. A simple fractal analysis method of the surface roughness. *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, vol. 145, iss. 1, pp. 40–45. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00860-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00860-4)
- [6] Лунин Б.С. Формирование кристаллической фазы при механохимической обработке поверхности кварцевого стекла. *Неорганические материалы*, 2021, т. 57, № 3, с. 313–319. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002337X2103009X>
- [7] IEEE 1554-2005. IEEE recommended practice for inertial sensor test equipment, instrumentation, data acquisition and analysis. IEEE, 2005.
- [8] Allan D.W. Statistics of atomic frequency standards. *Proc. IEEE*, 1966, vol. 54, iss. 2, pp. 222–230. DOI: <https://doi.org/10.1109/PROC.1966.4634>
- [9] Allan D.W. Historicity, strengths, and weaknesses of Allan variances and their general applications. *Gyroscope Navig.*, 2016, vol. 7, no. 1, pp. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2075108716010028>
- [10] Rutman J. Characterization of phase and frequency instabilities in precision frequency sources: fifteen years of progress. *Proc. IEEE*, 1978, vol. 66, iss. 9, pp. 1048–1075. DOI: <https://doi.org/10.1109/PROC.1978.11080>
- [11] Riley W. Handbook of frequency stability analysis. NIST, 2008.
- [12] Makdissi A., Vernotte F., De Clerq E. Stability variances: a filter approach. *Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2010, vol. 57, iss. 5, pp. 1011–1028. DOI: <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2010.1513>

- [13] Basarab M.A. The new wavelet-like Allan variance based on the atomic function. *PIERS*, 2021, pp. 2870–2877. DOI: <https://doi.org/10.1109/PIERS53385.2021.9694896>
- [14] Bregni S., Primerano L. The modified Allan variance as time-domain analysis tool for estimating the Hurst parameter of long-range dependent traffic. *Proc. IEEE GLOBECOM*, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2004.1378215>
- [15] Basarab M.A., Basarab D.A., Konnova N.S., et al. Analysis of chaotic and noise processes in a fluctuating blood flow using the Allan variance technique. *Clin. Hemorheol. Microcirc.*, 2016, vol. 64, no. 4, pp. 921–930. DOI: <https://doi.org/10.3233/ch-168011>
- [16] ALAMATH. Allan variance software: веб-сайт. URL: <http://www.alavar.org> (дата обращения: 15.12.2022).

Луни́н Бори́с Серге́евич — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Российская Федерация, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 3).

Басара́б Михаи́л Алексе́евич — д-р физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Конно́ва Ната́лья Серге́евна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Строга́нов Ива́н Серге́евич — ассистент кафедры «Информационная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Луни́н Б.С., Басара́б М.А., Конно́ва Н.С. и др. Применение метода вариации Аллана при исследовании физико-химических процессов на поверхности твердого тела. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2023, № 3 (108), с. 20–36. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-3-20-36>

**INTRODUCTION OF THE ALLAN VARIANCE METHOD
IN STUDYING THE PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES
ON THE SOLID BODY SURFACE**

B.S. Lunin¹

luninboris@yandex.ru

M.A. Basarab²

basarab@bmstu.ru

N.S. Konnova²

nkonnova@bmstu.ru

I.S. Stroganov²

stroganovis@bmstu.ru

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The Allan variation method is being effectively used to study stability of frequency generators and noise characteristics of the dynamic processes of various physical nature presented in the form of time series. At the same time, the methods of nonlinear dynamics, in particular, of the fractal analysis, are used both in processing the time series and in studying irregularities in profiles or surfaces. By analogy with this, the possibility of introducing the Allan variance method to analyze alterations in the solid body surface during chemical and thermal treatment was evaluated. Introduction of the Allan variance method makes it possible to quantify the roughness components corresponding to the surface defects of a certain size. Alterations in the surface of grounded and polished quartz glass plates were studied, as well as the melted rods during chemical dissolution of the surface layer. The presented graphs and calculated Allan variations for the profiles of various surfaces clearly demonstrate that alterations in the surface relief standard deviation during chemical etching of the quartz plates and bars is associated with the surface defects size. The results of studying the surface stay in good agreement with the estimates made by the fractal analysis method. Introduction of the Allan variance method makes it possible to optimize both the mechanical and the chemical surface treatment mode of various parts during their manufacture

Keywords

Allan variance, surface relief, surface defect, roughness, chemical treatment

Received 02.09.2022

Accepted 26.10.2022

© Author(s), 2023

REFERENCES

- [1] Patrikar R.M. Modeling and simulation of surface roughness. *Appl. Surf. Sci.*, 2004, vol. 228, iss. 1-4, pp. 213–220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.01.010>
- [2] Ayman O. Dinamika formirovaniya poverkhnostnoy sherokhovatosti pri obrabotke svobodnym abrazivom. Dis. kand. tekhn. nauk [Dynamics of surface roughness formation during processing with a free abrasive. Cand. Sc. (Eng.). Diss.]. St. Petersburg, ITMO Univ. Publ., 2005 (in Russ.).
- [3] Miller P.E., Suratwala T.I., Wong L.L., et al. The distribution of subsurface damage in fused silica. *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5991, art. 599101-1. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.638821>
- [4] Pfeifer P. Fractal dimension as working tool for surface-roughness problems. *Appl. Surf. Sci.*, 1984, vol. 18, iss. 1-2, pp. 146–164. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-5963\(84\)90042-4](https://doi.org/10.1016/0378-5963(84)90042-4)

- [5] Jahn R., Truckenbrodt H. A simple fractal analysis method of the surface roughness. *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, vol. 145, iss. 1, pp. 40–45.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00860-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00860-4)
- [6] Lunin B.S. Formation of a crystalline phase during mechanochemical surface treatment of quartz glass. *Inorg. Mater.*, 2021, vol. 57, no. 3, pp. 295–300.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020168521030092>
- [7] IEEE 1554-2005. IEEE recommended practice for inertial sensor test equipment, instrumentation, data acquisition and analysis. IEEE, 2005.
- [8] Allan D.W. Statistics of atomic frequency standards. *Proc. IEEE*, 1966, vol. 54, iss. 2, pp. 222–230. DOI: <https://doi.org/10.1109/PROC.1966.4634>
- [9] Allan D.W. Historicity, strengths, and weaknesses of Allan variances and their general applications. *Gyroscopy Navig.*, 2016, vol. 7, no. 1, pp. 1–17.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S2075108716010028>
- [10] Rutman J. Characterization of phase and frequency instabilities in precision frequency sources: fifteen years of progress. *Proc. IEEE*, 1978, vol. 66, iss. 9, pp. 1048–1075.
DOI: <https://doi.org/10.1109/PROC.1978.11080>
- [11] Riley W. Handbook of frequency stability analysis. NIST, 2008.
- [12] Makdissi A., Vernotte F., De Clerq E. Stability variances: a filter approach. *Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2010, vol. 57, iss. 5, pp. 1011–1028.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2010.1513>
- [13] Basarab M.A. The new wavelet-like Allan variance based on the atomic function. *PIERS*, 2021, pp. 2870–2877. DOI: <https://doi.org/10.1109/PIERS53385.2021.9694896>
- [14] Bregni S., Primerano L. The modified Allan variance as time-domain analysis tool for estimating the Hurst parameter of long-range dependent traffic. *Proc. IEEE GLOBECOM*, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2004.1378215>
- [15] Basarab M.A., Basarab D.A., Konnova N.S., et al. Analysis of chaotic and noise processes in a fluctuating blood flow using the Allan variance technique. *Clin. Hemorheol. Microcirc.*, 2016, vol. 64, no. 4, pp. 921–930. DOI: <https://doi.org/10.3233/ch-168011>
- [16] ALAMATH. Allan variance software: website. Available at: <http://www.alavar.org> (accessed: 15.12.2022).

Lunin B.S. — Dr. Sc. (Eng.), Leading Researcher, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (Leninskie Gory 1, str. 3, Moscow, 119991 Russian Federation).

Basarab M.A. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Head of the Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Konnova N.S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Stroganov I.S. — Assistant, Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Basarab M.A., Konnova N.S., Stroganov I.S. Introduction of the Allan variance method in studying the physical and chemical processes on the solid body surface. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2023, no. 3 (108), pp. 20–36 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-3-20-36>