

5. Геллер Ю.И., Попов А.К. Лазерное индуцирование нелинейных резонансов в сплошных спектрах. Новосибирск, 1981.
6. Lambropoulos P., Zoller P. // Phys. Rev. 1981. **A24**, No. 1. P. 379.
7. Магунов А.И., Страхова С.И. Препринт НИИЯФ МГУ.

1997, № 97–47/498.

8. Fano U. // Phys. Rev. 1961. **124**. P. 1866.
9. Andryushin A.I., Fedorov M.V., Kazakov A.E. // J. Phys. B. 1982. **15**. P. 2851.

Поступила в редакцию  
02.03.98

## ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.41

РАСТРОВАЯ МИКРОСКОПИЯ, СПЕКЛЫ И ИНФОРМАЦИОННАЯ  
ДИАГРАММА ГАБОРА

Ю. В. Васильев, Е. Ф. Курицына, А. Е. Лукьянов

(кафедра общей физики; кафедра физической электроники)

**Предложен информационный подход к решению задачи экспресс-анализа качества режущих инструментов современными взаимодополняющим и методами эксперимента — растровой микроскопии и оптики спеклов.**

Габор в 1961 г. опубликовал в журнале «Прогресс в оптике» работу «Свет и информация». Ее идеи служат фундаментом взаимопонимания специалистов в различных разделах прикладной оптики. В нашей работе на базе этих идей делается попытка связать качество лезвия безопасной бритвы с информацией, которая определяется пространственными неоднородностями острого края.

Современная растровая микроскопия — туннельная, атомно-силовая, электронная, лазерная, ближнеполевая оптическая и т.д. — позволяет получать колоссальный объем информации о состоянии режущего края. В поточном производстве возникает задача сжатия информации — требуется выделить минимальное число интегральных характеристик, которые могут объективно свидетельствовать о качестве режущего инструмента.

Цель работы — показать, что решить эту задачу возможно объединением различных оптических методов, например растровой электронной микроскопии и лазерных спеклов, так как интенсивности центральных лазерных спеклов по существу оказываются связанными с центральными коэффициентами дискретного представления Габора в оптике [1].

Качество лезвия с прямым краем длины  $L$  определяется состоянием поверхности режущей части. Ее форма — двусторонне-симметричная, ступенчато-клиновидная, со срезанной вершиной. Сверху образуется режущая площадка со средней шириной около 0,3 мкм. К ней примыкают две полированные щечки шириной в несколько десятков микрометров. У волокна под давлением режущей площадки в месте контакта возникает микротрещина, которую щечки расширяют. Клювик микротрещины распространяется вглубь волокна и производит его полное разрушение.

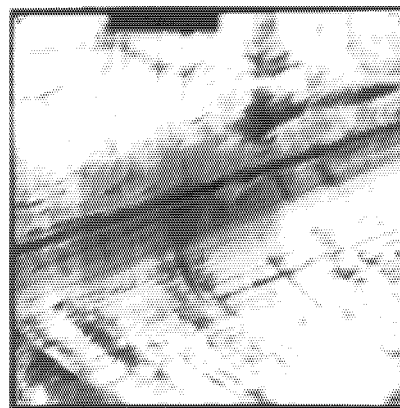


Рис. 1. Вид сверху на режущую площадку и боковые стороны заостренного конца лезвия в растровом электронном микроскопе

В растровом электронном микроскопе (РЭМ) JSM-U3 видно, что поверхность режущей площадки и щечек не плоская, а хаотически гофрированная. На рис. 1 представлена микрофотография участка лезвия на площади обзора  $33 \times 33$  мкм<sup>2</sup>. Показан вид сверху на режущую площадку (узкая черная полоска в средней части кадра) на фоне двух боковых сторон клина (светлые) с их микродефектами (темные участки). Оба микрорребра режущей площадки хаотически изменяют свое локальное направление в пространстве. Это свидетельствует о хаотической структуре гофра щечек (режущей площадки — см. рис. 1 в работе [1]). Увеличение высоты гребней, глубины впадин и резкости склонов гофра, а также их общего числа на единицу длины приводит к ухудшению качества лезвия. Это можно связать с информацией, присущей гофру.

Отклонения точек микрорребра от оси  $Oz$  (прямой линии края лезвия) представим в декартовых координатах как функции одной переменной  $z$ :  $\xi = \xi(z)$  —

в плоскости лезвия,  $\eta = \eta(z)$  — в перпендикулярной. Это случайные функции гофра, которые используются для построения функций информации по Хартли [2] (в целях простоты).

Как пример построим функцию информации с помощью РЭМ. Зафиксируем координату  $z = 0$ . Шаг квантования величины  $\xi$  (или  $\eta$ ) в области вероятных изменений определяется разрешающей способностью РЭМ. Пусть при пробеге электронного пучка (ток  $j = \text{const}$ ) может быть  $m_1$  различных, но равновероятных значений накопленного заряда  $q$  по  $\xi$ , который регистрируется прибором (по  $\eta - m_2$ ). Количество информации по Хартли равно  $I_1 = \log_2 m_1$  ( $I_2 = \log_2 m_2$ ). Требуется  $N$  пробегов луча через равные расстояния  $\Delta z$  на длине  $L$ , чтобы представить информационную функцию в пространстве переменных  $n, q$  в виде ступенчатой линии ( $n = 1, 2, \dots, N$ ). По теореме Котельникова [3] ее можно единственным образом интерполировать гладкой кривой, совпадающей с исходным гофром, если число  $N$  не меньше чем  $N_s = 2LF$ . Здесь  $F$  — максимальная пространственная частота спектра гофра, а  $N_s$  — число степеней свободы сигнала. Количество информации  $I_{1,2} = 2LF \log_2 m_{1,2}$  можно считать индикатором качества лезвия (для идеально гладкого и прямого  $I_{1,2} = 0$ ). В более строгом описании следует использовать понятие информации по Шеннону, и тогда связь между изменением энтропии и изменением качества становится совсем очевидной.

Такие же операции возможны и в частотном пространстве [4], в котором следует делать отсчеты в пространстве спектра микро рельефа через интервалы пространственных частот  $1/(2L)$ .

Современная точка зрения [5] состоит в том, что анализ одномерного сигнала  $\xi$  (или  $\eta$ ) проводится в двумерном пространстве (с ортогональными координатно-частотными осями), с использованием представления о локальном (скользящем) спектре и информационной диаграмме Габора. Пространство площадью  $2LF$  можно произвольно разбивать на удобные, прямоугольные информационные ячейки Габора, число которых равно  $N_s$ . Центры ячеек образуют решетку Габора, фиксированные расстояния между ними по оси координат  $a = L/n_1$ , по оси частот  $f = F/n_2$ . Здесь  $n_{1,2}$  — целые положительные числа, которые определяются из условия  $af = 1$  (аналог принципа неопределенности Гейзенберга). Тогда, применяя интерполяцию с помощью специальных линейных преобразований, можно единственным образом восстановить исходный сигнал по коэффициентам локальных спектров сигнала, которые совпадают с коэффициентами разложения сигнала в ряд Габора на информационной диаграмме.

Оптика лазерных спеклов фактически имеет дело с информационными ячейками Габора [6] и современным представлением о локальном спектре. На базе длиной  $a$  можно в эксперименте произвести фазовое фурье-преобразование (случайной) величины гофров  $\xi + \eta$  с весовой (амплитудной) гауссовой функцией.

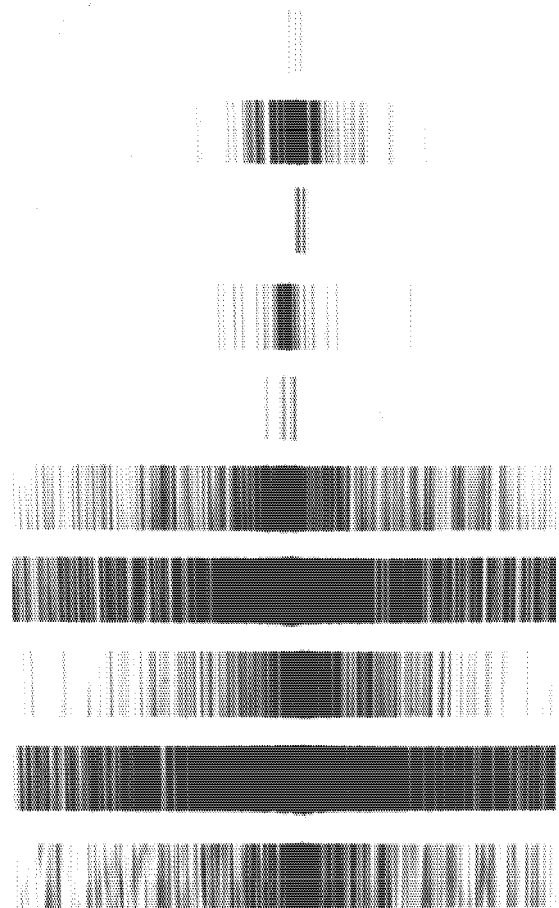


Рис. 2. Пример формирования картин линейных лазерных спеклов на решетке Габора. Нижние 5 картин спеклов — широкополосный вариант регистрации пространственных частот, верхние — сжатие информации при нелинейной фильтрации

На большом расстоянии от края формируются объективные лазерные спеклы Габора, в которых доминирует центральный [1]. Он несет информацию о центральном коэффициенте разложения суммарного сигнала локального микропрофиля лезвия в ряд Габора. Сдвиг лезвия по оси  $Oz$  на расстояния  $a, 2a, \dots$  при одновременном сдвиге фоторегистратора (например, листа фотобумаги) на эквидистантные расстояния позволяет получить спеклограмму на решетке Габора. Примерный вид получаемой картины для пяти соседних локальных участков лезвия показан на рис. 2 при большой величине экспозиции (нижняя часть рисунка) и малой (верхняя). Последний случай соответствует сжатию информации. Это полезно и необходимо при экспресс-анализе качества изделия: в необратимой, нелинейной фильтрации выделяются только центральные коэффициенты разложения Габора.

Экспериментально установлено, что хорошему качеству изделия соответствует высокая интенсивность центрального лазерного спекла. Ухудшению качества отвечает падение интенсивности центрального спекла и рост интенсивности сателлитов. Это в первую очередь связано с усилением влияния наиболее неприятных вариаций высоты гребней и глубины впа-

дин, возрастающих как по величине, так и по их числу на единице длины лезвия.

#### Литература

1. Васильев Ю.В., Курицына Е.Ф., Лукьянов А.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1997. №1. С. 73 (Moscow University Phys. Bull. 1997. No. 1).
2. Хартли Р.В.Л. // Теория информации и ее приложения. М., 1959. С. 5.
3. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М., 1962.
4. Вудворд Ф.М. Теория вероятностей и теория информации с применениями в радиолокации. М., 1955.
5. Bastiaans M.J. // Advanced Topics in Shannon Sampling and Interpolation Theory / Ed. R.J. Marks II. N. Y., 1993. P. 1.
6. Васильев Ю.В., Курицына Е.Ф., Лукьянов А.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1997. №4. С. 59 (Moscow University Phys. Bull. 1997. No. 4).

Поступила в редакцию  
26.12.97