

Makyoh-Imaging zur Charakterisierung von Oberflächendefekten



Alexander von Finck



Angela Duparré



Michael Pfeffer¹

¹ Hochschule Ravensburg-Weingarten

Die Erkennung und Bewertung von Oberflächenstrukturen und -defekten ist ein wesentlicher Bestandteil der Prozess- und Qualitätskontrolle. Hierfür ist es notwendig, eine empfindliche, automatisierte, möglichst quantitative Oberflächeninspektion in die Produktion zu integrieren. Mit der Methode des Makyoh-Imaging wird ein relativ unbekanntes, jedoch vielversprechendes Prinzip genutzt, bei dem unter kollimierter Beleuchtung lokale konvexe und konkave Strukturen reflektierender Oberflächen die Strahlstärke im detektierten Reflex beeinflussen.

Das Verfahren basiert auf einem über 2000 Jahre alten Konzept: Bronzene Spiegel reflektierten unter Sonneneinstrahlung spezifische, meist religiöse Muster an Tempelwände, während auf der Spiegeloberfläche selbst keine Strukturen erkennbar waren (Abb. 1). Dieser Effekt gab den Spiegeln den Namen »Ma-Kyoh« (japanisch für magischer Spiegel). Durch Invertieren dieser antiken Methodik lässt sich

umgekehrt aus dem Reflex auf Strukturen und Defekte der beleuchteten Oberfläche schließen. Die lokale Strahlstärkenmodulation lässt sich hierbei durch eine Funktion aus den lokalen Hauptkrümmungen der Oberfläche beschreiben, wodurch gerade Defekte nachweislich besser erkennbar sind als über Höhen- oder Gradientendaten der Oberfläche [1].

Makyoh-Imaging bietet als Instrument zur Charakterisierung der Struktur reflektierender Oberflächen sowohl Ansätze qualitativer als auch quantitativer Art. Aufgrund der direkten Empfindlichkeit auf lokale Krümmungen weist das Verfahren bereits qualitativ ein hohes Potenzial in der Defekterkennung und Defektlokalisierung auf (Abb. 2). Für die quantitative Rekonstruktion der Oberflächenstruktur aus dem Makyoh-Bild wurde verschiedene Ansätze aufgezeigt [2]. Diese kann zum einen, analog zur Deflektometrie, über Strukturierung der kollimierten Beleuchtung erfolgen. Zum anderen ist auch eine direkte Rekonstruktion der Oberflächenstruktur, d. h. ohne Beleuchtungsstrukturierung, aus einem einzelnen Makyoh-Bild möglich.

Hierfür wurde am Fraunhofer IOF ein Messaufbau realisiert (Abb. 3), mit dem die Feinstrukturrekonstruktion der Oberfläche sowohl über Beleuchtungsstrukturierung, als auch auf Basis homogener unstrukturierter Beleuchtung möglich ist. Die rekonstruierten Oberflächen mit Höhenskalen im Bereich weniger Nanometer und einer lateralen Auflösung im Mikrometerbereich (Abb. 4 und 5) verdeutlichen die hohe Empfindlichkeit des Verfahrens mit Potenzial in der prozessnahen Real-Time Messtechnik.



Abb. 1: Makyoh-Replik unter Sonnenbeleuchtung.

Fig. 1: Makyoh replica illuminated by the sun.

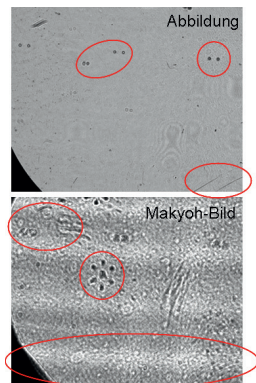


Abb. 2: Qualitative Defektcharakterisierung an beschichtetem Si-Wafer: Vergleich Makyoh-Bild und optische Abbildung der Probenoberfläche (gleicher Probenausschnitt 16 x 13 mm²).

Fig. 2: Located structures and defects in the same section (16 x 13 mm²) of a coated silicon wafer surface in the optical image (top) and the Makyoh image (bottom).



In process and quality control is a strong demand for the recognition and classification of surface structures and defects. Therefore, sensitive, automated, and preferably quantitative processes are needed. Makyoh imaging is a quite unknown, yet powerful optical characterization tool for surface analysis. Its operation principle is based on collimated sample illumination, where local convex and concave structures on the sample surface affect the intensity distribution in the reflected beam.

The principle of this technique is based on a more than 2000 years old concept: Bronze mirrors in Buddhist temples reflected specific, mostly religious patterns to temple walls when lightened by the sun, while on the reflecting surface itself no structures were recognizable

(Fig. 1). This effect led to the Japanese name „Ma-Kyoh“ (magic mirror). If this ancient methodology is inverted, it is reciprocally possible to characterize structures and defects of the illuminated surface from the reflected patterns. The intensity modulation by the sample is a function of the local principle curvatures of its surface. To inspect surfaces, curvature analysis is at this juncture in fact more sensitive to local defects when compared to gradient or height data analysis /1/, making Makyoh imaging a superior defect characterization and localization tool.

Makyoh imaging for characterization and defect inspection of reflective surfaces can be operated both in qualitative (Fig. 2) and quantitative mode. Different approaches were indicated for quantitative surface reconstruction

from Makyoh images /2/. In analogy to deflectometry, this can be realized on the one hand by structuring of the collimated illumination. On the other hand it is possible to reconstruct the surface structure from a single Makyoh image without structured illumination.

For this purpose a Makyoh set-up was realized at the Fraunhofer IOF (Fig. 3), allowing surface reconstruction based on homogeneous unstructured illumination as well as on structured one. Calculated sample surfaces of measured Makyoh images showed lateral resolutions with micrometer scales and height variation up to a few nanometers (Fig. 4 and 5), demonstrating the high sensitivity of this real-time measuring technology.

References:

- /1/ Knauer, M. et al.: Höhe, Neigung oder Krümmung?, DGaO-Proceedings 2006, ISSN: 1614-8436.
- /2/ von Finck, A.; Duparré, A.; Pfeffer, M.: Makyoh-Imaging zur Charakterisierung reflektierender Oberflächen, TM (to be published).

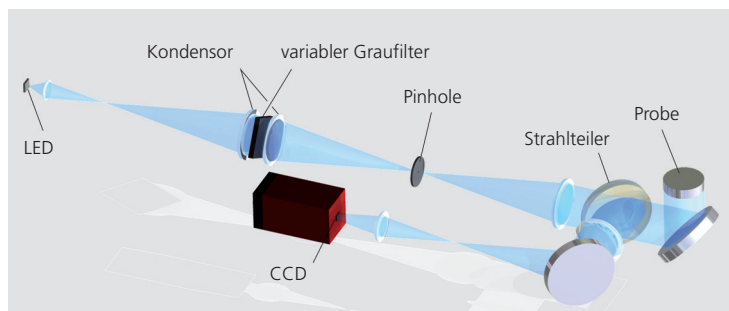


Abb. 3: Realisierter Makyoh-Aufbau.

Fig. 3: Realized Makyoh set-up.

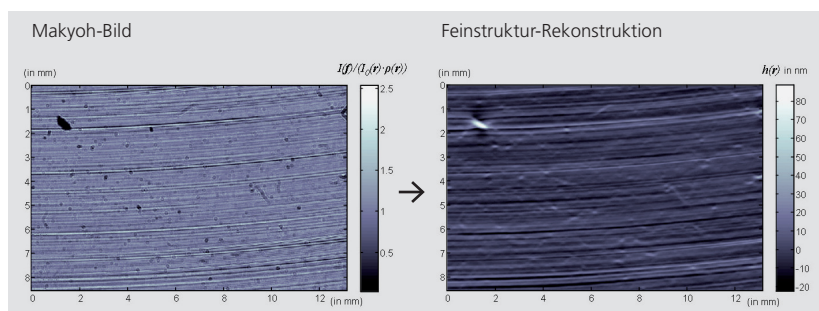


Abb. 4: Makyoh-Bild einer polierten Glasprobe (links) mit rekonstruierter Feinstruktur ohne Beleuchtungsstrukturierung (rechts).

Fig. 4: Makyoh image (left) with reconstructed surface (right) of a polished glass sample.

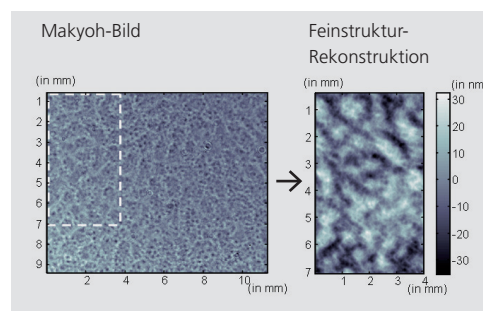


Abb. 5: Makyoh-Bild eines beschichteten Silizium-Wafers mit »Orangenhaut«-Defekt (links) und rekonstruierter Feinstruktur über Beleuchtungsstrukturierung (rechts).

Fig. 5: Makyoh image (left) with reconstructed surface (right) of a coated silicon wafer with "orange-peel" defect.