

# Tiefenätzen von Silicium



Björn Wilbertz und Thomas Geiling, 5microns GmbH

## Projektziel

// Eine neue DRIE-Anlage wird dafür genutzt, Mikrostrukturen in Silicium mittels Plasmabearbeitung anisotrop zu ätzen. Ziel der Inbetriebnahme ist das Erforschen des anlagenspezifischen Prozessfensters, um die Voraussetzung für die zeit- und kosteneffiziente Entwicklung kundenspezifischer Prozesse zu schaffen. Ziel der Untersuchung ist es, den Einfluss der Prozessparameter auf die Homogenität des Ätzergebnisses zu ermitteln.

## Lösung

// Aufgrund der Vielzahl an relevanten Prozessparametern sind für die Erforschung des Prozessfensters eine große Anzahl an Versuchen notwendig. Hier liegt der Rückgriff auf einen DoE-Ansatz nahe, um dies möglichst zeit- und kosteneffizient zu realisieren. Mit Hilfe von Minitab wurde der gesamte Versuch geplant, protokolliert und ausgewertet.

## Ergebnis

// Mit der von Minitab erstellten Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse ist es gelungen, ein besseres Verständnis des Ätzprozesses zu erlangen. Die Signifikanz des Drucks hat sich auch in anderen Versuchsreihen bestätigt und eine Verbesserung der Homogenität von ca. 33 % konnte erzielt werden.

## Projektziel

Die 5microns GmbH, ansässig in Ilmenau, beschäftigt sich mit der Entwicklung und Fertigung von Mikrosystemen im Kundenauftrag. Seit kur-

zem steht dem Unternehmen eine neue DRIE-Anlage<sup>1</sup> zur Verfügung, die eine ähnliche ältere Anlage vom gleichen Typ ersetzen soll. Diese Anlage wird dafür genutzt, Mikrostrukturen in Silicium mittels Plasmabearbeitung anisotrop zu ätzen. Ziel der Inbetriebnahme ist das Erforschen des anlagenspezifischen Prozessfensters. Dies schafft die Voraussetzung für die zeit- und kosteneffiziente Entwicklung kundenspezifischer Prozesse.

Der Siliciumätzprozess, der sämtlichen DRIE-Anlagen zugrunde liegt, ermöglicht die Herstellung von Strukturen im Silicium mit senkrechten Seitenwänden. Wie in Abbildung 1 gezeigt, besteht er aus mehreren, zyklisch alternierenden Teilschritten: dem Passivieren (1), dem Durchbrechen (2) und dem isotropen Ätzen (3). Beim Passivieren wird plasmaunterstützt eine Polymerschicht auf der gesamten Wafer-Oberfläche inkl. aller Seitenwände abgeschieden, die das darunterliegende Material vor dem Ätzangriff schützen soll. Beim anschließenden Durchbrechen der Passivierung wird der Ätzangriff so gerichtet, dass die Polymerschicht auf den horizontalen Flächen bevorzugt abgetragen wird, aber auf den vertikalen Seitenwänden der Strukturen erhalten bleibt. Daran anschließend wird Silicium während des isotropen Ätzschritts von den nun offen liegenden Flächen ausgehend abgetragen. Stimmt man die Teilschritte optimal aufeinander ab, können sehr tiefe Ätzungen mit nahezu senkrechten Seitenwänden realisiert werden. Das exemplarische Ergebnis einer Tiefenätzung ist in Abbildung 2 gezeigt.

<sup>1</sup> DRIE – deep reactive ion etching, dt. tiefes reaktives Ionenätzen

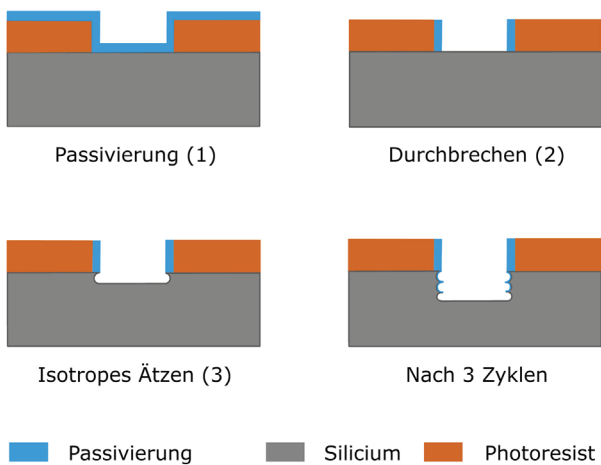


Abbildung 1: Prinzipieller Ablauf des zyklischen Tiefenätzens von Silicium

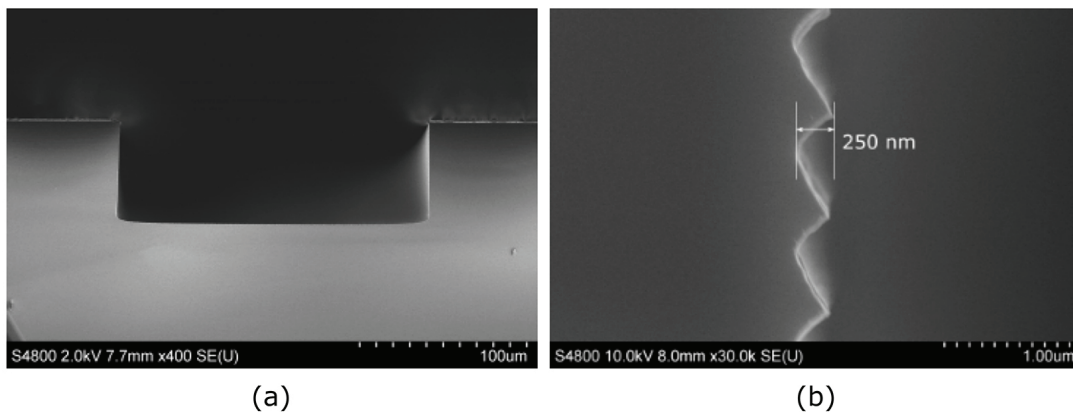


Abbildung 2: REM<sup>2</sup>-Aufnahmen eines in Silicium geätzten Grabens mit senkrechten Seitenwänden (a) und den für DRIE-Prozesse charakteristischen Seitenwänden (b)

Aufgrund der Vielzahl an relevanten Prozessparametern sind für die Erforschung des Prozessfensters eine große Anzahl an Versuchen notwendig. Hier liegt der Rückgriff auf einen DoE-Ansatz nahe, um dies möglichst zeit- und kosteneffizient zu realisieren. Im folgenden Beispiel wird der isotope Ätzschritt zum Abtragen des Siliciums genauer untersucht.

Ziel der Untersuchung ist es, den Einfluss der Prozessparameter auf die Homogenität des Ätzergebnisses zu ermitteln. Homogenes oder inhomogenes Ätzen bezeichnet, wie gleichmäßig

ein Wafer über die gesamte Fläche geätzt wird. Im Idealfall werden die gleichen Strukturen immer gleich tief geätzt, egal wo sie sich auf dem Wafer befinden.

## Lösung

Mit Hilfe von Minitab wurde der gesamte Versuch geplant, protokolliert und ausgewertet. Die DoE-Funktionalitäten von Minitab haben diesen Vorgang um ein Wesentliches vereinfacht.

Zunächst werden drei zu untersuchenden Prozessparameter festgelegt: der Druck in der Vakuumkammer, die Flussrate des Prozessgases und die ins Plasma eingeprägte Leistung. Um

die Zielgröße Homogenität quantifizierbar darzustellen, wird die Ätztiefe von acht gleichen Strukturen entlang einer Linie vom Zentrum bis zum Rand des Wafers vermessen. Als Zielgröße wird der normierte Variationskoeffizient der Messwerte verwendet.

Nachdem Zielgröße und Parameter festgelegt sind, erstellt Minitab einen vollfaktoriellen Versuchsplan mit 2 Stufen und 3 Faktoren. Die Stufen der Parameter werden auf Basis von Vorversuchen festgelegt.

Das Modell wurde von Minitab mittels einer schrittweisen Regression erstellt, wobei das Alpha-Niveau für die Aufnahme und den Ausschuss bei 0,05 liegen. Es wurden sämtliche

<sup>2</sup> REM - Rasterelektronenmikroskop

Wechselwirkungen in Betracht gezogen. Das resultierende Modell wird anhand von drei Kriterien bewertet:

1. Welches Bestimmtheitsmaß weist das Modell auf?
2. Sind Ausreißer in den Daten vorhanden?
3. Wie sind die Residuen verteilt?

Das Modell weist ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 89,50\%$  auf. Die Darstellung des Wahrscheinlichkeitsnetzes in Abbildung 3 zeigt keine Ausreißer. Dass die Residuen nicht auf der eingezeichneten Linie liegen, zeigt, dass nicht alle Effekte durch das Modell erklärt werden können. Das Histogramm wiederum zeigt deutlich, dass der Stichprobenumfang zu gering ist, um eine Normalverteilung der Residuen bewerten zu können. Die aus dem Modell gezogenen Schlussfolgerungen müssen daher mit weiteren Versuchen verifiziert werden.

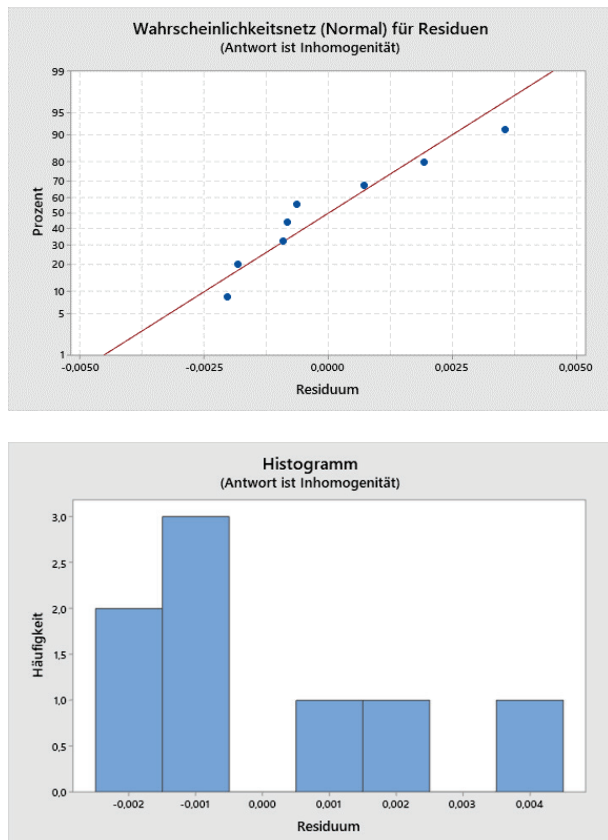


Abbildung 3: Wahrscheinlichkeitsnetz und Histogramm für Residuen

Für die Auswertung werden das in Abbildung 4 gezeigte Pareto-Diagramm sowie die Darstellung der Residuen in chronologischer Reihenfolge herangezogen.

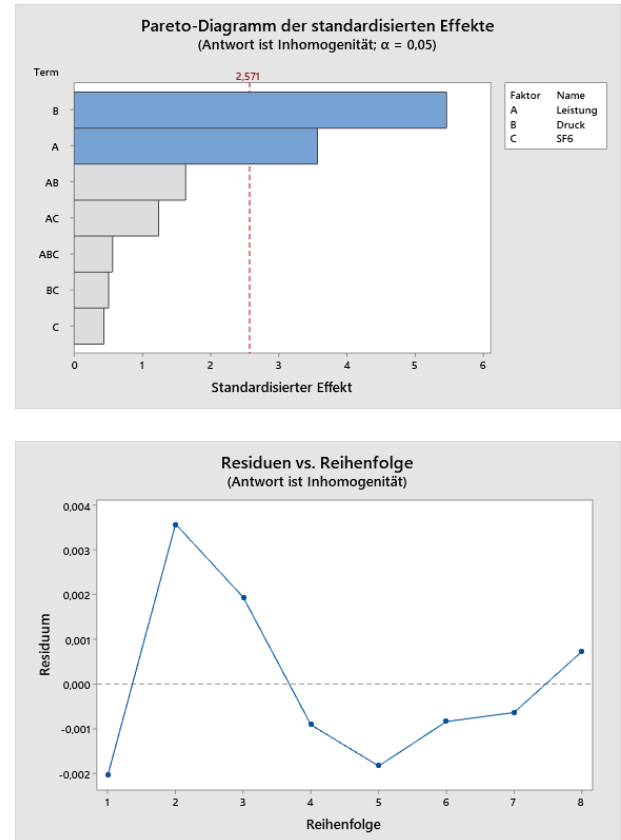


Abbildung 4: Pareto-Diagramm und Darstellung der Residuen über der Reihenfolge

Welche Aussagen liefert das Modell? Anhand des Pareto-Diagramms der Effekte erkennt man, dass nur die primären Faktoren Leistung und Druck signifikanten Einfluss auf die Homogenität haben. Die Flussrate sowie alle höheren Wechselwirkungen scheinen sich nicht auszuwirken. Jedoch muss hier die Aussagekraft des Modells mit berücksichtigt werden: aus dem Wahrscheinlichkeitsnetz ist bekannt, dass sich noch mehr Effekte auswirken müssen. Der Stichprobenumfang erlaubt jedoch keine Identifikation dieser Effekte.

Wo sind diese zusätzlichen Effekte zu suchen? Bekannt ist, dass der Zustand der Prozesskammer, in der die Ätzung durchgeführt wird, einen Einfluss auf die Ätzergebnisse hat. Daher wird

sie vor jeder Ätzung mit einem Reinigungsprozess in einen definierten Ausgangszustand überführt. Jedoch liefert das Diagramm der Residuen über die Reihenfolge das Indiz, dass dieser Reinigungsprozess nicht denselben Ausgangszustand erreicht: Es sind zwei Trends im Verlauf der Residuen erkennbar. Eine Überprüfung des Reinigungsprozesses erscheint also sinnvoll.

Welches weitere Vorgehen kann aus den Ergebnissen abgeleitet werden? Zur Überprüfung der oben gewonnenen Erkenntnisse empfiehlt sich ein zweistufiger Ansatz:

1. Eine Wiederholung der Versuchsreihe zum Vergrößern des Stichprobenumfangs verbessert die Aussagekraft des Modells im Hinblick auf die Wechselwirkungen. Zusätzlich erlaubt die Wiederholung die Überprüfung des Reinigungsprozesses: Bleibt der Trend erhalten, muss der Prozess angepasst werden.
2. Lassen sich die Residuen nicht durch Wechselwirkungen erklären, muss das Modell um höhere Ordnungen erweitert werden, damit auch nichtlineare Effekte berücksichtigt werden können.

## Ergebnis

Mit der von Minitab erstellten Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse ist es gelungen, ein besseres Verständnis des Ätzprozesses zu erlangen. Die oben vorgestellten Grafiken ermöglichen die Bewertung der Aussagekraft des Modells gemeinsam mit den wesentlichen Schlussfolgerungen daraus.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind in die weitere Prozessentwicklung und den iterativen Lernprozess eingeflossen und dienen als Grundlage weiterer Versuche. Die Signifikanz des Drucks hat sich auch in anderen Versuchsreihen bestätigt und eine Verbesserung der Homogenität von ca. 33 % konnte erzielt werden.



ADDITIVE Soft- und Hardware  
für Technik und Wissenschaft GmbH

Max-Planck-Str. 22 b  
D-61381 Friedrichsdorf/Ts.

Telefon: +49 (0)61 72-59 05-0

Fax: +49 (0)61 72-77 613

E-Mail: [info@additive-net.de](mailto:info@additive-net.de)

Internet: <http://www.additive-net.de/software>

ADDITIVE – seit über 30 Jahren der bewährte Partner für professionelle Hard- & Softwarelösungen in Industrie, Forschung & Wissenschaft. Vom Standardprodukt bis zu maßgeschneiderten Applikationsprojekten inklusive Servicekonzept. ADDITIVE steht für Full-Service-Dienstleistung und nachhaltigen Wissenstransfer. Die hochqualifizierten, interdisziplinär zusammengestellten Teams der ADDITIVE-Geschäftsbereiche freuen sich darauf, Ihre Aufgaben optimal und effizient umzusetzen.

#### Intelligente Lösungen in 4 Geschäftsbereichen

##### ADDITIVE-Geschäftsbereich SOFTWARE

- Vertrieb von führender Premium-Software für Technik & Wissenschaft zur Datenerfassung, Berechnung, Analyse, Visualisierung & Automation
- Beratung, Betreuung und Service für ADDITIVE-Softwareprodukte

##### ADDITIVE-Geschäftsbereich MESSTECHNIK & SENSORIK

- BeanAir® – kabellose Datenerfassung & Sensoren

##### ADDITIVE-Geschäftsbereich IT-SERVICE

- IT-Services, Cloud-Services, Web-Applikationen und Datenintegration

##### ADDITIVE-Geschäftsbereich ACADEMY

- Zertifizierte, praxisorientierte Produkt- und Themenschulungen, Workshops und Seminare
- Schulungen im ADDITIVE-Trainingszentrum (oder bei Ihnen vor Ort)

5microns GmbH

Ehrenbergstr. 11  
D-98693 Ilmenau

Telefon: +49 (0)3677-799639-0

E-Mail: [kontakt@5microns.de](mailto:kontakt@5microns.de)

Internet: <http://www.5microns.de>

Wir sind ein innovatives und dynamisches Unternehmen, dessen Kompetenzen im Bereich der Mikrosystemtechnik liegen. Unser Unternehmenskonzept umfasst die **Beratung** sowohl von Erstanwendern als auch von Spezialisten der Mikrosystemtechnik, den **Entwurf** von Mikrosystemen, die **Entwicklung** und die **Charakterisierung** von MEMS-Prototypen sowie die **Mikrofertigung** und Prozessierung von Wafern.

Wir agieren als **One-Stop-Shop** für Kunden, die die Entwicklung und Fertigung von Mikrosystemen ausgliedern wollen. Unsere Dienstleistungen setzen dabei nicht erst bei der Entwicklung im Kundenauftrag ein, sondern wir begleiten die Auftraggeber bereits in einem früheren Stadium des **Produktentstehungszyklus**.