

Kapitel 9

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine neue elektrochemische Methode vorgestellt, mit der sich dreidimensionale Mikrostrukturen mit hoher Genauigkeit herstellen lassen. Mit feinen Werkzeuelektroden konnten Kupfer, Edelstahl und Silizium so präzise bearbeitet werden, daß daraus Mikroelemente mit Kantenschärfen von weit unter $1\ \mu\text{m}$ entstanden. Sogar die Herstellung von Unterscheidungen und freistehenden Elementen gelang. Das Besondere der Methode besteht darin, daß elektrochemische Reaktionen wie das Ätzen oder das Abscheiden von Material durch die Verwendung von ultrakurzen Spannungspulsen räumlich begrenzt werden. Dabei wird keine Isolation durch Masken oder ein spezielles Zelldesign benötigt, wie es bei herkömmlichen elektrochemischen Materialbearbeitungsmethoden der Fall ist.

Dahinter steckt die Idee, die elektrochemischen Doppelschichten auf den Elektrodenoberflächen nur lokal umzuladen. Da elektrochemische Reaktionsraten exponentiell vom Potentialabfall in der Doppelschicht abhängig sind, bewirken selbst moderate lokale Unterschiede des Potentials stark unterschiedliche Reaktionsraten. Die räumlich begrenzte Umladung gelingt, indem die Spannung in Form von Nanosekunden-kurzen Pulsen angelegt wird. Dabei wird ausgenutzt, daß die Umladung der Doppelschichtkondensatoren eine Zeitkonstante besitzt, die vom Widerstand durch den Elektrolyten und damit vom Abstand zwischen den Elektroden abhängt. Während einiger Nano-

sekunden werden nur Doppelschichtkondensatoren merklich aufgeladen, die im Abstand von wenigen Mikrometern zur Gegenelektrode liegen.

Diese Überlegungen wurden experimentell bestätigt und anhand zahlreicher Mikrostrukturen demonstriert. So ließen sich Metalle mit einer Folge von 50 ns kurzen Pulsen so präzise ätzen, daß das Material nur in einem Abstand von etwa 3 μm um die Werkzeugelektrode aufgelöst wurde. Zur Herstellung von Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis ließ sich eine zylinderförmige Werkzeugelektrode aus einem abgeflachten Draht wie ein Mikrofräser einsetzen. Durch bipotentiostatische Regelung wurde sichergestellt, daß die Oberfläche der Werkstücke nur unter der Werkzeugelektrode reagierte und sonst unverändert blieb. Als erstes Material wurde Kupfer bearbeitet. Herausragende Beispiele für die erfolgreiche Ausführung waren eine über 20 μm tiefe, zweistufige Struktur und eine sehr präzise geätzte, 2,5 μm dünne Zunge. Der Bearbeitungsprozeß konnte auch umgekehrt werden, so daß Kupferkristalle selektiv unter der Werkzeugelektrode abgeschieden wurden.

Für mögliche technische Anwendungen der elektrochemischen Mikrostrukturierung ist besonders interessant, daß auch die Mikrobearbeitung von Edelstahl gelang. Nachdem ein geeigneter Elektrolyt gefunden worden war, um die Passivschicht des korrosionsfesten Edelstahls aufzulösen, konnten Edelstahl-Bleche mit sehr hoher Präzision geätzt werden, was durch zahlreiche winzige Pyramiden und Grabenstrukturen demonstriert wurde. Die Werkzeugelektrode schnitt zerstörungsfrei durch die Mikrokristallite des Stahls, so daß sein Gefüge in der Tiefe freigelegt wurde. Mit einer feinen Drahtschlinge als Werkzeug konnte sogar ein freistehender Mikrocantilever aus einem Edelstahl-Blech herausgeätzt werden. Als Testobjekt für die mechanischen Eigenschaften einfacher Mikroelemente wurde sein Schwingungsverhalten vermessen. Es zeigt, daß die Materialeigenschaften des Stahls durch die Mikrobearbeitung tatsächlich nicht beeinträchtigt wurden.

Am Beispiel von Silizium wurde demonstriert, daß auch die Bearbeitung von Halbleitern möglich ist. In hochdotiertes p- und n-Silizium konnten selektiv Löcher geätzt werden. Allerdings war die Ortsauflösung bei vergleichbaren

Pulslängen schlechter als bei der Bearbeitung von Metallelektroden und lag mit 25 ns Pulsen bei 5–9 μm . Die kleine Gesamtkapazität an der Oberfläche von Halbleiterelektroden und der im Vergleich zum Elektrolyten relativ hohe Widerstand des Halbleiters wirken sich negativ aus. Wenn es gelingt, mit verdünnteren Elektrolyten zu arbeiten, sollte sich die Ortsauflösung künftig verbessern lassen.

Anhand einfacher ein- und zweidimensionaler Modelle wurden die Prozesse beim Ätzen von Kupfer simuliert. Danach nimmt die maximale Ätzrate, die direkt unter einer Werkzeugelektrode erreicht wird, unter typischen experimentellen Bedingungen mit 50 ns Pulsen bereits in einer Entfernung von 3 μm von der Werkzeugkante fast auf Null ab. Durch Simulationen wurde auch der Einfluß der wichtigen experimentellen Parameter auf die Ortsauflösung beim Ätzen untersucht. Dazu gehören die Pulslänge und der spezifische Elektrolytwiderstand, die beide linear in die Ortsauflösung eingehen. Mit möglichst kurzen Pulsen und verdünnten Elektrolyten kann die beste Auflösung erreicht werden. Der Arbeitsabstand um die Werkzeugelektrode, in dem Material merklich aufgelöst wird, wächst zwar mit zunehmender Bearbeitungszeit in den ersten Sekunden schnell an, verändert sich aber nach einigen Minuten praktisch nicht mehr. Die einfachen Simulationen stimmen gut mit quantitativen Experimenten überein. So betrug beispielsweise der Arbeitsabstand nach zehnminütigem Ätzen von Kupfer bei der Bearbeitung mit 25 ns kurzen Pulsen nur etwa 2 μm .

In dieser Arbeit wurde gezeigt, wie eine Werkzeugelektrode als Mikrofräser zum Abtragen von Material eingesetzt wird, wodurch individuelle Mikrostrukturen hergestellt werden können. Durch geschicktes Werkzeugdesign können sogar echte dreidimensionale Strukturen geätzt werden und Unterschneidungen in einem einzigen Arbeitsschritt hergestellt werden. Darüber hinaus ist es aber auch denkbar, mit einem Stempel eine große Stückzahl von Mikroelementen gleichzeitig zu erzeugen. Auf diese Weise ließe sich die Produktionsgeschwindigkeit erhöhen – ein wichtiger Aspekt für die technische Anwendung.

Auch die Ortsauflösung wird sich gegenüber den hier gezeigten Strukturen künftig weiter verbessern lassen. Nach der eingangs vorgestellten einfachen Abschätzung sollte mit 100 ps kurzen Pulsen eine Auflösung von 10 nm möglich sein. Weitere experimentelle Arbeiten zur elektrochemischen Mikrostrukturierung haben mittlerweile gezeigt, daß mit Spannungspulsen von unter 5 ns Dauer eine Ortsauflösung von wenigen Hundert Nanometern erreicht wird [91].