

# Kapitel 4

## Entwicklung dreidimensionaler Elektrodenarrays

### 4.1 Konzept

In der Einleitung wurden bereits die grundlegenden Anforderungen an chronisch zu implantierende Stimulationselektroden aufgeführt. Die Abhängigkeit vom Einsatzzweck und Implantationsort bezüglich der Elektrodengeometrie, -anzahl und -anordnung waren Gegenstand der Diskussion in Kapitel 3. Aus dem konkreten Anwendungsfall – der Entwicklung einer Sehprothese in Form eines epiretinal zu plazierenden Implants – und aus der Forderung nach der Einbindung der Herstellung in einen Prozeß zur Schaltungsfertigung in CMOS-Technologie ergeben sich weitere medizinische und technische Randbedingungen. Die Realisation von Elektrodenarrays, die diesen Randbedingungen genügen, werden im folgenden beschrieben.

#### 4.1.1 Technische und medizinische Randbedingungen

Die Entwicklung von dreidimensionalen Stimulationselektroden-Arrays zur epiretinalen Ganglienzellstimulation hat sich an den physiologischen Gegebenheiten an (bzw. auf) der Retina zu orientieren. Zur Erzielung eines visuellen Sinneseindrucks müssen möglichst viele Elektroden verteilt die Nervenzellen der oberen Schicht der Retina selektiv stimulieren können. Die Anordnung der Elektroden kann in erster Näherung, d. h. bei kleinen Abmessungen des Arrays gegenüber der Krümmung des Bulbus, auf einem planaren Substrat erfolgen. Mit größer werdenden Abmessungen ist eine Anpassung an die Krümmung der Netzhautoberfläche unumgänglich. Das kann beispielsweise durch stückweise planare Substrate erfolgen, die über flexible Bereiche miteinander verbunden sind (s. a. [Tri97]). Bestimmend für die Größe und den Abstand der Stimulationselektroden ist die Nervenzelldichte und -größe. Die vertikale Lage der zu reizenden Zellen bestimmt die notwendige Höhe der Stimulationselektroden. Aus den elektrisch/physiologischen Parametern

für die Auslösung von Aktionspotentialen sowie der geforderten Selektivität ergibt sich die benötigte Oberfläche der Elektroden<sup>1</sup>. Weitere medizinische Randbedingungen sind das neutrale Verhalten im umgebenden Gewebe, also der Biokompatibilität der verwendeten Materialien und die Stabilität der Elektroden im Betrieb, d. h. der Beständigkeit gegenüber elektrochemischer Auflösung.

Die technischen Randbedingungen ergeben sich aus der Forderung nach der Integrierbarkeit des Prozesses zur Herstellung der Elektroden in den Fertigungsprozeß der integrierten Schaltung, i. a. dem CMOS-Prozeß. Für die Herstellung der oben geforderten großen Elektrodenhöhen bietet sich in der Mikrostrukturtechnik der Einsatz von mikrogalvanischen Strukturierungstechniken an, mit denen große Aspektverhältnisse<sup>2</sup> erzielt werden können [Büt94]. Sind die dreidimensionalen Elektroden über eine Mikrogalvanik zu fertigen, hat diese im Anschluß an die Prozeßschritte zur CMOS-Fertigung zur erfolgen, da die Lithographie-Prozeßschritte eine planare Oberfläche benötigen. Dabei ist sicherzustellen, daß die CMOS-Schaltung in der wässrigen, elektrochemisch aktiven Umgebung während der Galvanik keinerlei Korrosion oder Eindiffundierung unerwünschter Ionen unterliegt. Die galvanische Abscheidung des Elektrodenmaterials aus geschmolzenen Salzen ist wegen der dazu nötigen hohen Temperaturen von einigen hundert Grad gänzlich ungeeignet, da sowohl die integrierte Schaltung als auch das formgebende Material (i. a. Fotolack) dabei zerstört werden. Die Notwendigkeit, das Implantat und damit auch die Schaltung vor der chemisch aktiven Umgebung im Körper zu schützen, bedingt eine Passivierung der Schaltung mit geeigneten Schichten (s. u.). Diese Passivierung kann gleichzeitig zum Schutz der Schaltung im Galvanikbad dienen.

#### 4.1.2 Variationen zur Geometrie und Abmessungen

Die Bestimmung von geeigneten Elektrodengeometrien und Abmessungen für ein Array, das zur epiretinalen Stimulation von Nervenzellen der Netzhaut verwendet werden soll, ist Gegenstand der laufenden Forschung<sup>3</sup>. Daher können (noch) keine idealen Parameter für ein Elektrodenarray dieser Anwendung benannt werden. Aufgrund der Möglichkeit, die Funktionalität eines Arrays in *in-vitro*-Experimenten an explantierten, lebenden Netzhäuten untersuchen zu können, umfaßt das Design der nachfolgend beschriebenen Elektrodenarrays eine Vielzahl von Variationen in Geometrie und Abmessungen, um zur Bestimmung dieser Parameter dienen zu können.

Realisiert wurden Arrays mit  $2 \times 2$ -Elektroden bis  $8 \times 8$ -Elektroden, teilweise mit einer umgebenden, indifferenten (großflächigen) Elektrode. Eine Übersicht über die verschiedenen Formen der Grundfläche der Elektroden zeigt Abb. 4.1. Die Zuleitungen aller Elektroden werden in der oberen Metallage geführt, welche die größte Dicke besitzt und daher die niedrigsten Zuleitungswiderstände garantiert. Lediglich Leitungskreuzungen werden in der

---

<sup>1</sup>Der zur Stimulation benötigte Strom und die für das Elektrodenmaterial zulässige Stromdichte liefert eine minimal benötigte Elektrodenoberfläche.

<sup>2</sup>das Verhältnis zwischen Strukturbreite zur -höhe.

<sup>3</sup>In Deutschland gibt es allein zwei, in den USA mindestens drei Projekte verschiedener Arbeitsgruppen zur Entwicklung einer implantierbaren Sehprothese

unteren Metallage realisiert, wie beispielsweise zur Kontaktierung der inneren Kreiselektrode einer Ringelektrodenform (Abb. 4.1(b)). Sind Leitungskreuzungen nicht möglich, da z. B. die Elektrode auf einem Teil der sie ansteuernden Schaltung platziert werden muß, kann eine Geometrie wie in Abb. 4.1(c) zum Einsatz kommen<sup>4</sup>. Wird der der Elektrode zur Verfügung stehende Platz durch umgebende Schaltung beschränkt, muß gegebenenfalls eine rechteckige Elektrodenform gewählt werden (Abb. 4.1(d)), ansonsten ist eine kreisförmige Grundfläche aufgrund der günstigeren Stromdichtenverteilungen bei fehlenden Ecken vorzuziehen 4.1(a).

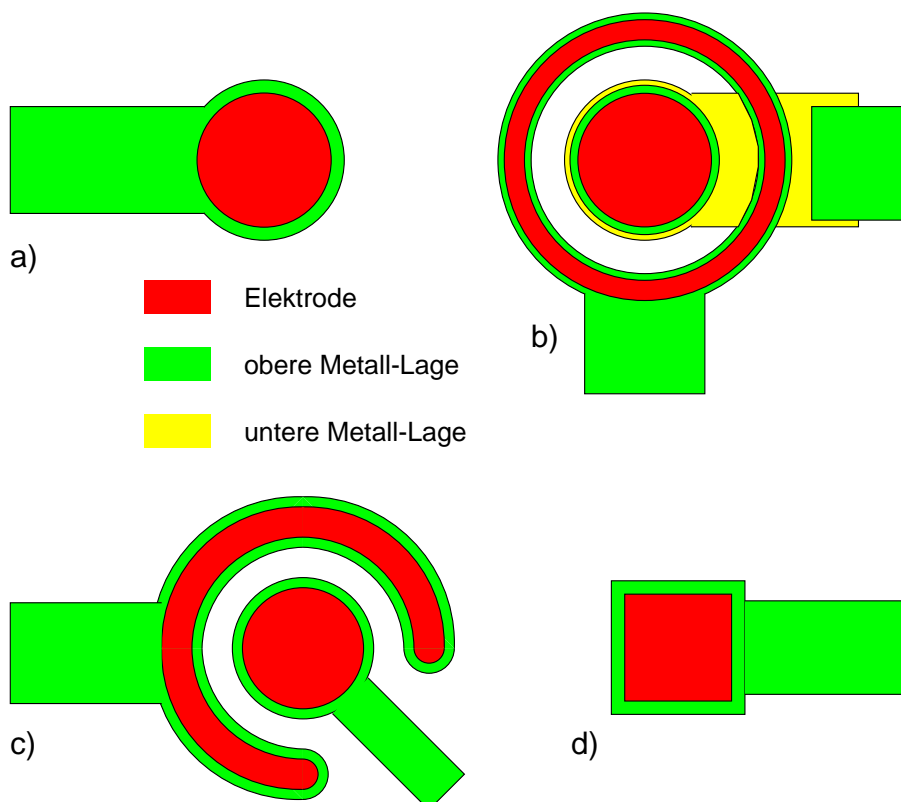


Abb. 4.1: Alternative Elektrodengeometrien (s. Text)

Die Abstände der Elektroden in einem Array variieren von  $50 \mu m$  bis  $500 \mu m$ . Der Durchmesser bzw. die Kantenlänge einer Elektrode beträgt  $15 \mu m$  bis  $100 \mu m$  bei kreisförmigen bzw. quadratischen Elektroden. Bei den Ringelektroden, wie auch bei den offenen Ringelektroden, besitzt die innere Kreiselektrode einen Radius von  $46 \mu m$  bis  $120 \mu m$ , der äußere Ring eine Breite von  $15 \mu m$  bis  $30 \mu m$ . Die Flächen zwischen Innen- und Außen- elektrode folgen dabei Verhältnissen zwischen 1:1, 1:2 und 1:3. Schließlich wurden noch Arrays entworfen, die neben den einzelnen Elektroden eine das Array umgebende oder umschließende großflächige Elektrode aufweisen, die als indifferente Elektrode genutzt werden kann.

<sup>4</sup>Diese Geometrie sei im weiteren als *offene Ringelektrode* bezeichnet.

### 4.1.3 Der Wafer- und Chipaufbau

Ist eine Mikrogalvanik Bestandteil eines Prozesses zur Herstellung mikromechanischer oder mikrosystemtechnischer Bauelemente, erfolgt vor der eigentlichen Galvanik zumeist eine Abscheidung einer geeigneten Saatschicht auf der gesamten Waferoberfläche. Diese maximal einige hundert Nanometer dicke Metallschicht ist nach erfolgter Galvanik naßchemisch oder über ein Plasmaätzverfahren zu entfernen. Alle auf dem Wafer befindlichen, im Fotolack freiliegenden Flächen zur galvanischen Abscheidung sind elektrisch miteinander verbunden und liegen über eine Kontaktierung des Waferrandes auf dem gleichen Potential. Das führt, unter Vernachlässigung unterschiedlicher Aufwachsraten durch verschieden große Öffnungen im Fotolack (s. dazu Abschnitt 4.2.3), zu Strukturen gleicher Höhe über den gesamten Wafer.

Die Möglichkeit zur Herstellung verschieden hoher Elektroden zur selektiven Stimulation von Nerven und Nervenzellen in unterschiedlicher Tiefe im Nervengewebe (z. B. im Cortex) oder zur Anpassung an eine nichtplanare Topographie (z. B. der Retina) ist jedoch wünschenswert [R<sup>+</sup>95]. Daher wurde im nachfolgend beschriebenen Prozeß auf eine durchgängige Saatschicht verzichtet. Statt dessen erfolgt die Kontaktierung der Elektrodenflächen zur galvanischen Abscheidung über eine strukturierte Metallisierung, die eine Verbindung der Elektrodenarrays mit mindestens zwei der vier Randsegmente herstellt, und damit mindestens zwei verschiedene Aufwachshöhen pro Array erlaubt. Dazu werden die untereinander elektrisch isolierten Segmente im Galvanikbad während verschieden großer Zeitspannen auf das Abscheidopotential gelegt. Von jedem der vier Randsegmente führen breite Leiterbahnen über eine Hälfte des Wafers. Die Leiterbahnen kreuzen sich kontaktfrei. Die Abbildung 4.2 zeigt den Entwurf dieser Kontaktierung.

In die freien Flächen zwischen den Leiterbahnen werden die einzelnen Arrays plaziert. Von den einzelnen Elektrodenflächen der Arrays führen Leiterbahnen zu den Bondflächen am Chiprand und weiter zu den breiten Leiterbahnen der Randsegmente (Abb. 4.3). Nach erfolgter Galvanik werden die Wafer beidseitig entlang der breiten Leiterbahnen gesägt. Dadurch werden die einzelnen Elektroden mit ihren Zuleitungen und Bondflächen am Chiprand elektrisch voneinander getrennt.

## 4.2 Realisation

Bei der Umsetzung der entworfenen Geometrien dienen 6“-Siliziumwafer als Grundlage der Prozessierung. Die Strukturierung erfolgt in Abscheide- und Abtrageprozessen unter Verwendung lithographischer Standard-Methoden zur Fertigung integrierter Schaltungen. Aufgrund der Vielzahl verschiedener Elektrodenarrays und der Notwendigkeit der Erzeugung von definierten Randstrukturen für eine selektive Galvanik, kann jedoch nicht die gebräuchlichere Methode der Projektionslithographie genutzt werden, bei der durch Nebeneinanderprojizieren der gleichen Maske (*Stepping*) die gesamte Fotolackschicht des Wafers mit identischen Strukturen belichtet wird. Vielmehr müssen 1:1-Masken verwendet

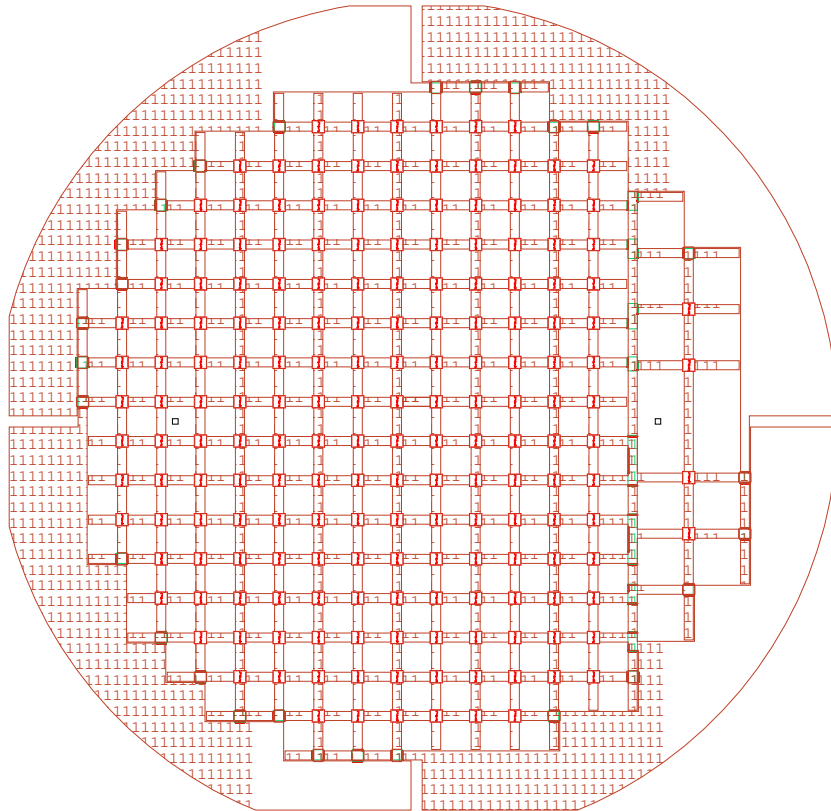


Abb. 4.2: Die Zuleitungsführung zur selektiven Galvanik

werden, die im direkten Kontakt mit dem Wafer den Fotolack der gesamten Waferfläche in einem Schritt belichten.

Die Notwendigkeit für die Herstellung von dreidimensionalen Elektroden wurde bereits in Abschnitt 4.1.1 erörtert. Die Auswahl geeigneter Materialien und ihre Prozessierung ist Gegenstand der folgenden Betrachtungen.

#### 4.2.1 Die Wahl geeigneter Elektrodenmaterialien

Das Einbringen technischer Materialien in einen biologischen Organismus für einen langen Zeitraum erfordert die Sicherstellung der Verträglichkeit dieser Materialien mit dem umgebenden Gewebe, sowie die Stabilität der Materialien in Kontakt ihm. Zur Bestimmung der Eignung eines Materials werden beide Bedingungen in Biokompatibilitätstests überprüft. Anhand standardisierter Tests kann die Wirkung der Freisetzung des Materials oder Teilen seiner Zusammensetzung auf definierte Zellumgebungen festgestellt werden. Geeignete Materialien führen zu keiner oder nur zu einer geringen Zellreaktion, die biologische Umgebung bleibt intakt. Gelegentlich können auch bestimmte Gewebereaktionen, wie eine Umschließung des als Fremdkörper erkannten Materials mit Bindegewebszellen, toleriert werden. Ungeeignete Materialien führen in Tests häufig zu einer verminderten

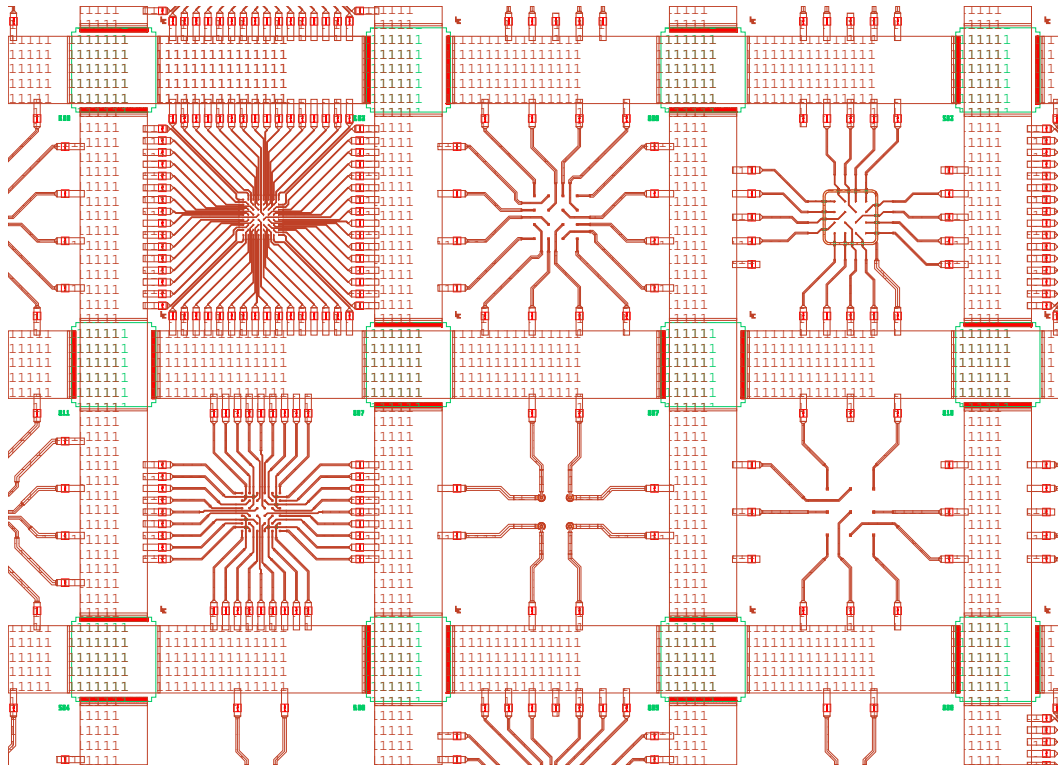


Abb. 4.3: Die Leitungsführung zu den Elektrodenflächen (Ausschnitt)

Zellteilung oder einem geringen Zellspreading bis hin zu einer ausgeprägten Zytotoxizität, dem Absterben der dem Material ausgesetzten Zellen.

Beim Einsatz der Mikrosystemtechnik zur Entwicklung von implantierbaren Geräten sind daher die bereits für technische Anwendungen gebräuchlichen Materialien und Herstellungsverfahren auf ihre Eignung in biologischer Umgebung zu untersuchen. So zeigen z. B. unedlere Metalle, die in der Mikromechanik als Galvanikmetall Verwendung finden, wie Kupfer, Eisen oder Nickel mangelnde Biokompatibilität und Korrosionsbeständigkeit [WH96]. Schwermetalle scheiden aufgrund ihrer zytotoxischen Wirkung vor allem auf Nervenzellen gänzlich aus. Gute Eigenschaften hingegen zeigen Edelmetalle, sowie bestimmte Edelstähle und das in der Biomedizintechnik verbreitete Titan und seine Verbindungen.

Ein weiterer Aspekt für den Einsatz eines Metalls als Stimulationselektrodenmaterial ist neben seiner Biokompatibilität das Verhalten bei der Einprägung physiologisch sinnvoller Stimulationssignale in umgebendes Nervengewebe. Kriterien sind dabei neben der Korrosionsbeständigkeit bei biphasischen Pulsströmen die zulässige Stromdichte und die Spannungsgrenzen für einen Betrieb ohne Sauerstoff- oder Wasserstoffgasung.

Die Erfüllung aller Anforderungen in idealer Weise gelingt dabei keinem Material. So ist Gold als geeignetes Metall für die Erzeugung mikromechanischer Bauelemente via Galvanik bekannt. Ebenso zeichnet es sich durch eine gute biologische Verträglichkeit aus. Seine Resistenz gegenüber Korrosion macht es zu einem geeigneten Material in der biomedizinischen Technik (z. B. in der Dentaltechnik). Auch als Material für Ableitelektroden

findet es Einsatz, welche hochohmig, d. h. ohne Stromfluß über das Elektroden/Elektrolyt-Interface, elektrische Potentialänderungen an Zellen detektieren müssen. Jedoch zeigt es bei der Verwendung als Stimulationselektrodenmaterial eine größere Neigung zu Korrosion als die meisten anderen Edelmetalle [B<sup>+</sup>77]. Platin und Platinverbindungen wie Platin-Iridium hingegen zeigen gute Eigenschaften als Stimulationselektrodenmaterial mit einer geringeren Neigung zur Korrosion. Die geringen Impedanzen von Platin resultieren aus dem Auf- und Abbau oberflächlicher Oxid- und Wasserstoffschichten beim Anlegen einer äußeren Spannung [CJ92]. In der Mikromechanik und Mikrosystemtechnik findet Platin in planaren Schichten Einsatz, jedoch nicht zur Fertigung dreidimensionaler Strukturen.

Als Material für Herzschrittmacher-Elektroden findet Titannitrid zunehmend Verwendung. Es zeichnet sich durch eine gute Bioverträglichkeit, eine gute Beständigkeit gegenüber Korrosion und niedrige Impedanzen bei höherfrequenten Stimulationssignalen aufgrund der kapazitiven Eigenschaften seines Elektroden/Elektrolyt-Interfaces aus [Sch92]. Der Einsatz von Titannitrid in der Mikrosystemtechnik ist, wie auch beim Platin, auf die Erzeugung dünner Schichten in PVD<sup>5</sup>-Prozessen beschränkt.

In der Gruppe der Platin-Metalle ist Iridium in den vergangenen Jahren immer mehr in zum Gegenstand der Forschung für die Fertigung leistungsfähiger Stimulationselektroden geworden. Es ist das chemisch inaktivste Metall der Platingruppe [HW85] und bietet daher eine gute Grundlage elektrochemisch stabiler Elektroden mit guter biologischer Verträglichkeit. Wichtiger noch, zeichnet sich Iridium als Elektrodenmaterial durch eine sehr hohe Kapazität zur Speicherung von Ladung an einer oberflächlichen, elektrisch leitfähigen Oxidschicht in wässriger Umgebung aus. Zur Bildung dieser Oxidschicht ist eine sogenannte *Aktivierung* notwendig, ein wiederholter Spannungszyklus an der Iridiumelektrode in wässriger Lösung. Die Ursache der großen Kapazität sind hochgradig reversible Übergangsreaktionen von H<sup>+</sup> und OH<sup>-</sup> und zahlreiche Wechsel der Oxidationsstufen des Iridiums in der oberflächlichen Oxidschicht [Z<sup>+</sup>78]. Beebe und Rose [BR88] geben für aktivierte Iridiumelektroden einen deutlich höheren maximalen Ladungseintrag in die Oxidschicht von 2–4 mC/cm<sup>2</sup> an<sup>6</sup>, verglichen mit Platin von 0,3–0,4 mC/cm<sup>2</sup>. Weiterhin zeichnet sich diese Oxidschicht dadurch aus, daß sie sehr beständig gegenüber Auf- oder Ablösung in den wässrigen Elektrolyten ist [R<sup>+</sup>83]. Abb. 4.4 zeigt ein veranschaulichendes Modell für die chemischen Reaktionen bei der Ladungsspeicherung.

Wünschenswert sind also dreidimensionale Elektroden aus Iridium(oxid), um die in der Netzhaut liegenden Zellen dauerhaft und sicher mit niedrigem Energieaufwand stimulieren zu können. Jedoch ist Iridium nur planar per Sputter-Technologie in dünnen Schichten aufzutragen, bei galvanischen Abscheidungsverfahren ist die Erzeugung hoher Ir-Schichten aufgrund von wachstumsbegrenzenden Schichtspannungen problematisch [A<sup>+</sup>67]. Günstiger ist es, die 3D-Strukturierung mit Gold in einem mikrogalvanischen Verfahren zu erzielen (s. Abschnitt 4.2.3), um anschliessend die Elektrodenoberfläche mit einer dünnen Iridiumschicht zu belegen. Da galvanische Abscheidungsverfahren gegenüber Aufdampf- und

---

<sup>5</sup> *Physical Vapor Deposition* - beispielsweise Sputtern oder Aufdampfen

<sup>6</sup> Die angegebenen Grenzen für die Spannung bezüglich der Gasung werden in elektrochemischen Untersuchungen zumeist größer angegeben, als die in *in-vivo* Experimenten unter der Berücksichtigung von Korrosion und Gewebeschädigung

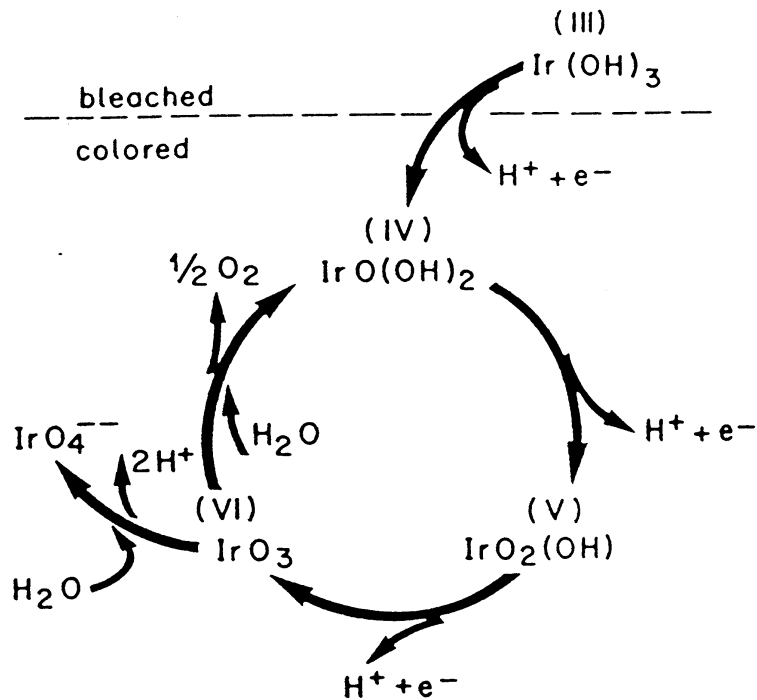


Abb. 4.4: Ein Modell für die Ladungsspeicherung an Ir-Elektroden (aus [K<sup>+</sup>84])

Sputterverfahren den prinzipiellen Vorteil besitzen, auch nichtplanare Oberflächen bedecken zu können, ist es möglich, bei dreidimensionalen Strukturen auf einem Substrat, auch auf deren Seitenflächen ein Metall abzuschleifen. Sputtern und viel mehr noch Aufdampfen hingegen verlangen nach möglichst orthogonal zum Atom- oder Molekularstrahl stehenden Niederschlagsflächen. Die Bildung lokaler elektrischer Spannungen an der Elektrodenoberfläche durch Exposition verschiedener Metalle zum Elektrolyten muß jedoch verhindert werden, da durch auftretende Korrosionen die Elektrode zerstört werden kann. Die Iridiumschicht hat die Goldelektrode daher möglichst vollständig zu bedecken. Somit ist es erforderlich, die Abscheidung der dünnen Iridiumschicht ebenfalls in einem mikrogalvanischen Verfahren zu realisieren (Abschnitt 4.2.3).

## 4.2.2 Die Prozeßabfolge

In einem kombinierten Prozeß zur Erzeugung von dreidimensionalen Stimulationselektroden mit integrierter Ansteuerelektronik bedingt die Verwendung von nicht CMOS-Prozeß kompatiblen Metallen für die Elektroden, wie den Edelmetallen, den notwendigen Abschluß der gesamten Prozessierung zur Erzeugung der Schaltung vor dem ersten Schritt zur Fertigung der Elektroden. Aus bereits erwähntem Grund kann nach erfolgter Mikrogalvanik keine Lithographie mehr zur weiteren Strukturierung eingesetzt werden. Damit schränken sich die verbleibenden Möglichkeiten auf ganzflächige Abscheide- oder Abtragsprozesse ein.

Für die nachfolgend beschriebenen Elektrodenarrays wurde auf eine Integration von CMOS-Schaltungen verzichtet. Dennoch wurde der Fertigungsprozeß so konzipiert, daß die ein-

zelenen Prozeßschritte im Anschluß an einen CMOS-Prozeß erfolgen können, also CMOS-kompatibel sind. Die Basis des Prozesses zur Herstellung dreidimensionaler Elektrodenstrukturen bildet eine Zweilagennmetallisierung, wie sie auch im Prozeßablauf zur Fertigung von CMOS-Schaltungen zu finden ist. Ergänzt wird sie durch eine Schichtfolge auf den Elektrodenflächen als Saatschicht<sup>7</sup> und eine Fotolack-Dickschicht zur Strukturierung einer Goldgalvanik.

Abbildung 4.5 zeigt in einer Schnittansicht das Siliziumsubstrat, auf dem zunächst durch thermische Oxidation eine etwa 770nm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht aufgebracht wird. Anschließend wird die erste Metallage in Form einer 500nm dicken Aluminiumschicht durch Sputtern aufgetragen. Die Strukturierung erfolgt durch Plasmaätzen, wobei die zu verbleibende Metallisierung mit Fotolack abgedeckt ist. Aufgrund der geringeren Dicke und des damit verbundenen höheren Square-Widerstandes findet die erste Metallage im Design der Elektrodenarrays nur bei Leitungskreuzungen Verwendung.

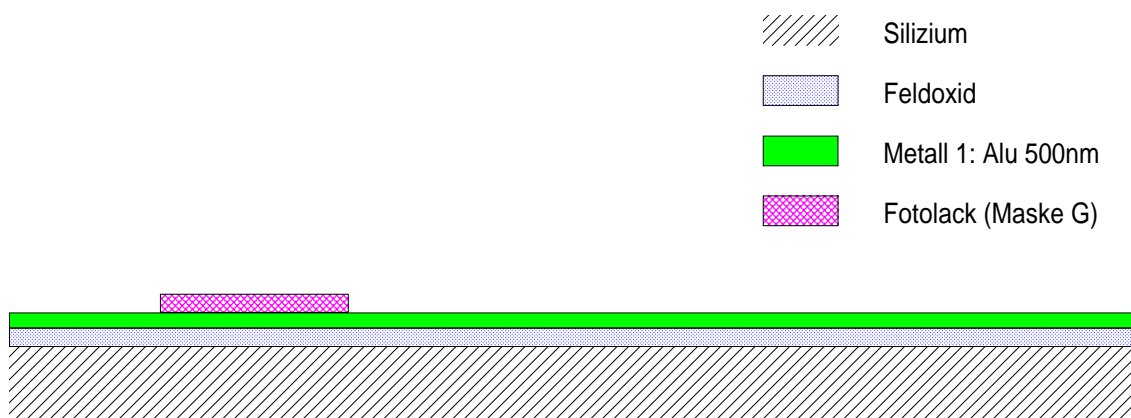


Abb. 4.5: Vor der Plasma-Strukturierung der ersten Metallage

Eine 900nm dicke Oxidschicht, die über einen CVD-Prozeß abgeschieden wird, trennt später beide Metallagen elektrisch voneinander. Die Öffnung der Durchkontaktierung<sup>8</sup> erfolgt in einem Plasmaätzprozeß (Abbildung 4.6).

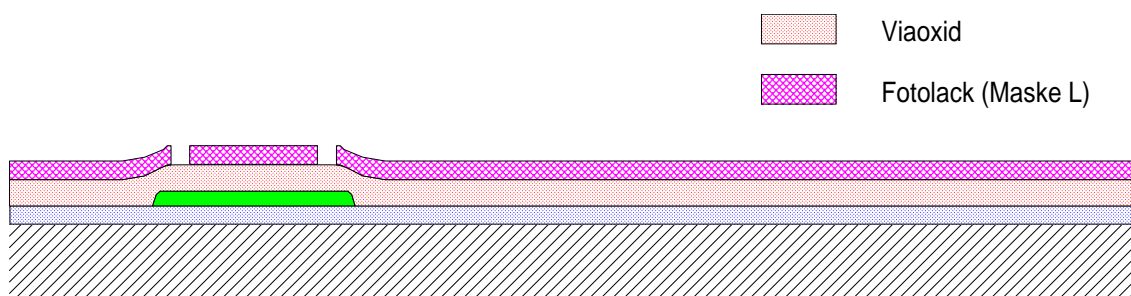


Abb. 4.6: Vor der Plasma-Strukturierung des Viaoxids

<sup>7</sup>häufig auch engl.: *Platingbase*

<sup>8</sup>der Verbindungsstellen beider Metallagen - *Viaholes*

Die zweite Metallage besitzt eine Dicke von 1000nm. In ihr sind die Leiterbahnen von der Randkontaktierung zu den einzelnen Elektrodenarrays und dort von den Bond- zu den Elektrodenpads ausgeführt. Ihre Strukturierung erfolgt analog zur ersten Metallage (Abbildung 4.7).

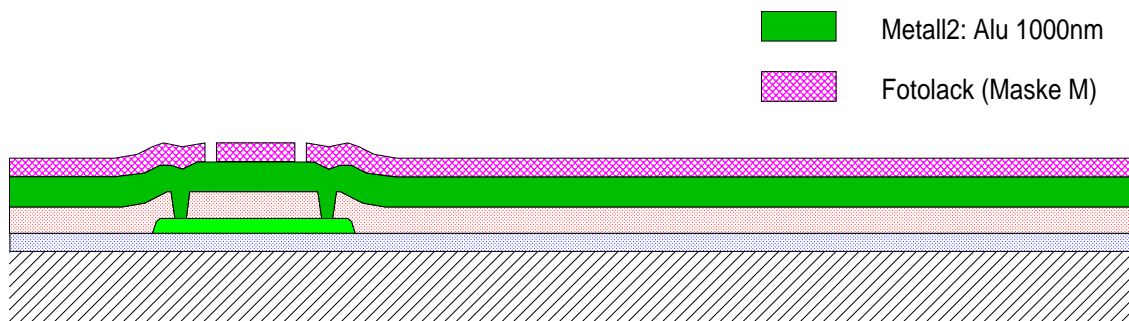


Abb. 4.7: Vor der Plasma-Strukturierung der zweiten Metallage

Zur Passivierung der Arrays wird über die zweite Metallage eine kombinierte Schicht aus 750nm SiO<sub>2</sub> und 500nm SiN<sub>4</sub> in CVD-Prozessen abgeschieden. Die SiN<sub>4</sub>-Schicht dient dabei einerseits zur Einstellung der Schichtspannung der Passivierung, andererseits als eine in elektrolytischer Umgebung stabile, biokompatible Deckschicht. Analog zum CMOS-Prozeß erfolgt die Öffnung der Bondpads in der Passivierung über eine Plasmaätzung (Abbildung 4.8).

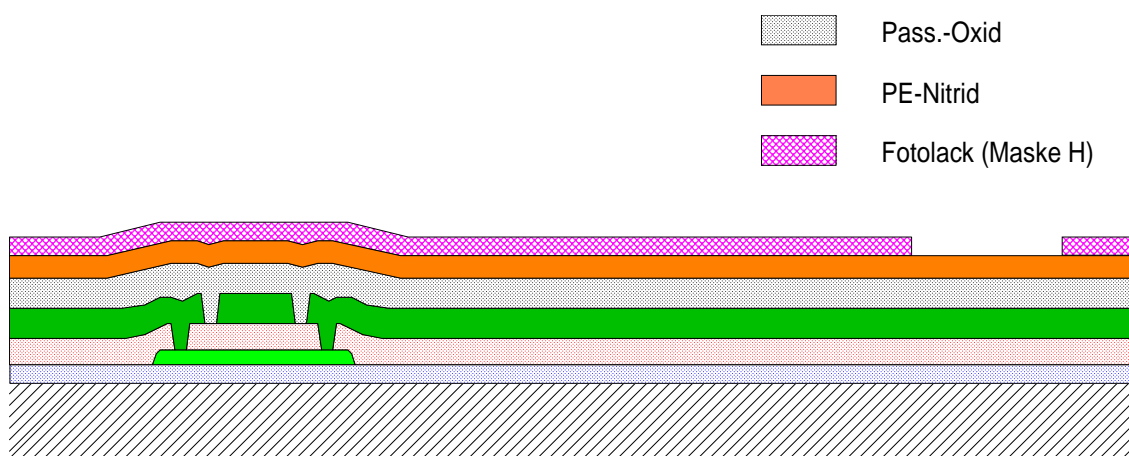


Abb. 4.8: Vor der Plasma-Strukturierung der Passivierungsschichten

Die Öffnung der Elektrodenpads kann nicht auf gleiche Weise (und damit nicht gleichzeitig) wie die der Bondpads erfolgen. Als Grundlage für die spätere Gold-Galvanik benötigen die Elektrodenpads eine geeignete Saatschicht. Die Aluminiumschicht der Bondpads ist dafür ungeeignet. Daher wird eine Goldschicht durch Bedampfen aufgebracht, auf der das galvanisch abzuschcheidende Gold haftet. Allerdings verändern in das Siliziumsubstrat eindiffundierende Goldatome die Eigenschaften der CMOS-Schaltung durch Erzeugung von Rekombinationszentren<sup>9</sup> bis hin zum Versagen der Schaltung. Eine vor dem

<sup>9</sup>Die mittlere Lebensdauer der Minoritätsträger sinkt linear mit der Zunahme der Goldkonzentration

Gold aufgedampfte Platin-Schicht dient als Diffusionssperre für die Goldatome. Zusätzlich ermöglicht eine Titanschicht die Haftung der Gold/Platin-Schicht auf den Aluminium-Elektrodenpads. Zur Strukturierung dieser Ti/Pt/Au-Schicht dient ein Lift-Off-Prozeß. Das Entfernen dieser Schichtfolge außerhalb der Elektrodenflächen geschieht durch Aufbringen und Strukturieren einer Fotolackschicht (Abb. 4.9).

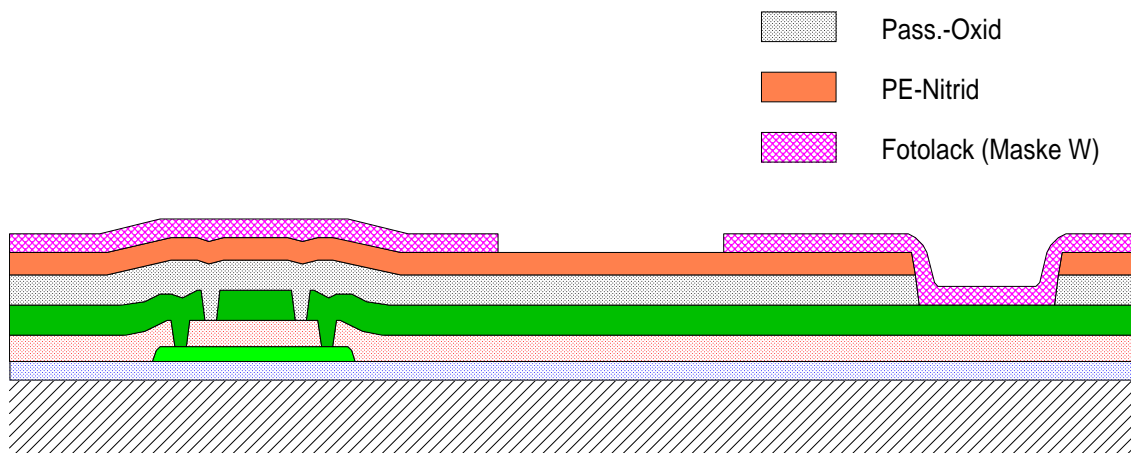


Abb. 4.9: Vor dem Plasma-Ätzen der PE-Nitridschicht über den Elektrodenflächen

Eine saubere Trennung der Schichtfolge auf dem Fotolack, die abgelöst werden soll, und der zu verbleibenden Schichtfolge auf den Elektrodenflächen wird durch die Erzeugung überhängender Kanten erreicht, an denen die aufgedampften Metallschichten unterbrochen sind. Dazu wird zunächst die obere Siliziumnitrid-Schicht über eine Plasmaätzung über den Elektrodenflächen entfernt. Anschließend wird die darunter liegende  $\text{SiO}_2$ -Schicht in einem Naßätzprozeß isotrop geätzt, so daß eine überhängende Kante an der Siliziumnitrid-Schicht entsteht (Abb. 4.10).

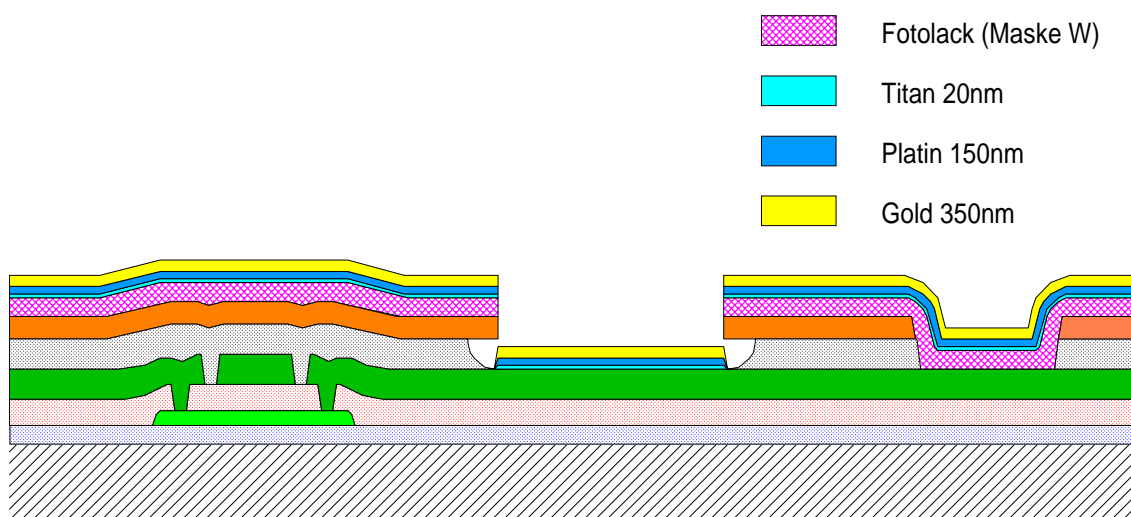


Abb. 4.10: Nach der Naßätzung der USG-Schicht und Aufdampfen der Plating-Base

(s. [Sze81])

Für die Formung der Elektroden im galvanischen Abscheidungsprozess wird eine Dickschicht-Fototechnik verwendet (Abb. 4.11). Den Öffnungen der Elektroden in der Passivierung entsprechend finden sich Öffnungen in der Dicklackmaske. Ihre Abmessungen wurden gegenüber der Passivierungsöffnungen jedoch um einige Mikrometer vergrößert. Das dient einerseits dazu, die Verjüngung der Fotolacköffnung mit zunehmender Lacktiefe auszugleichen<sup>10</sup>, andererseits schließt das leicht über die Kante der SiN<sub>4</sub>-Schicht hinauswachsende Gold einen möglicherweise verbliebenen Hohlraum unter der überhängenden Kante. Die zu erzeugende Elektrodenhöhe bedingt eine mindestens ebenso hohe Fotolack-Schicht zur Formung, da die aufwachsende Goldschicht nach Erreichen der Oberkante der Fotolack-Schicht isotrop weiterwächst und somit unerwünschte pilzähnliche Strukturen ausbildet.

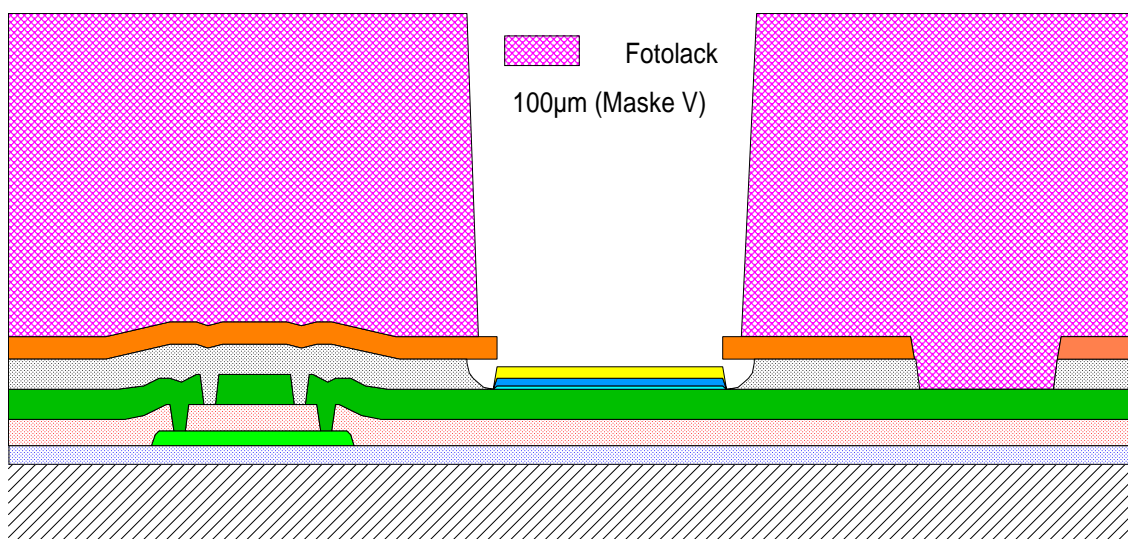


Abb. 4.11: Nach Aufbringen und Strukturieren des dicken Fotolacks

Nach erfolgter Goldgalvanik wird die Dickschicht-Fotolackmaske aufgelöst (Abb. 4.12). Das Vereinzeln der Elektrodenarray-Chips durch Sägen des Wafers und die anschließende Häusung und Bonden der Dies ermöglicht die weitere elektrochemische Bearbeitung der Elektroden (s. u.) wahlfrei für einzelne Elektroden ausführen zu können.

Besteht die Notwendigkeit zur Verrundung der Elektrodenkanten, z. B. aufgrund der Vermeidung von zu hohen Feldstärken oder zur Formung der Elektrode für eine bessere Durchdringung der oberen Netzhauschicht, kann im Anschluß an die Galvanik ein Elektropolierschritt erfolgen, bei dem in elektrolytischer Lösung<sup>11</sup> an den Kanten Material abgetragen wird.

Zur Verbesserung der Elektrodeneigenschaften (s. dazu Abschnitt 4.2.1) werden die Elektrodenoberflächen in einem weiteren Galvanik-Prozessschritt mit einer Iridiumbeschichtung versehen. Da die Formgebung der Elektroden bereits mit der Goldgalvanik erfolgt ist, kann sich die Iridiumgalvanik auf die Erzeugung einer einige hundert Nanometer bis wenige Mikrometer dünnen Deckschicht beschränken (Abb. 4.13).

<sup>10</sup>Die Ursache dafür liegt in der endlichen Kantensteilheit des Fotolacks, bedingt durch eine Abnahme der Lichtintensität in größeren Lacktiefen bei der Belichtung von Fotopositivlacken.

<sup>11</sup>Für Gold sind i. a. cyanidhaltige Elektrolyte geeignet, in denen es in gelöst werden kann

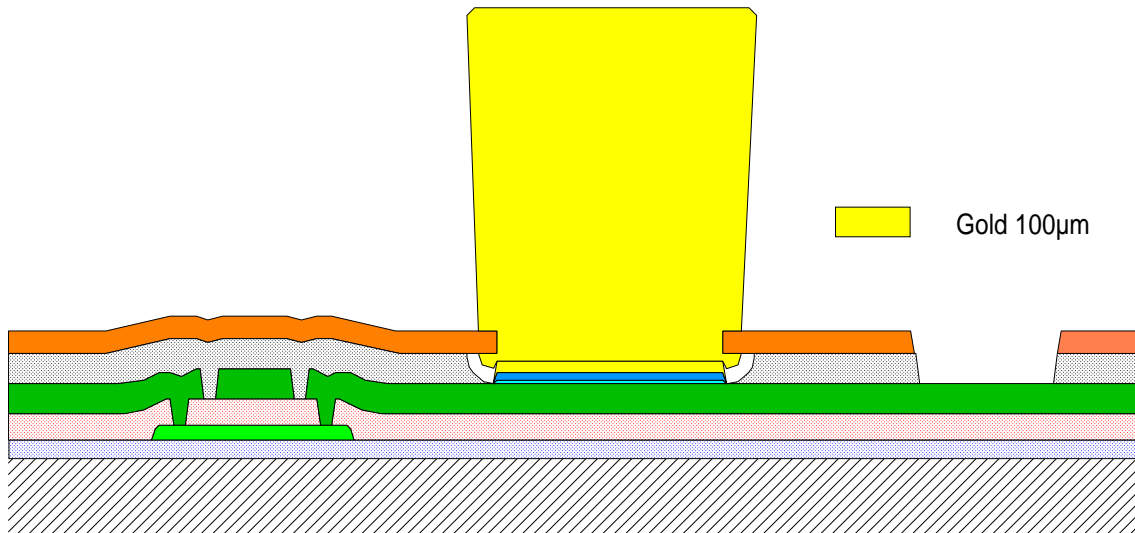


Abb. 4.12: Nach der Goldgalvanik

Für die gesamte Prozessierung der Elektrodenarrays werden sechs Masken benötigt. Bei der Ergänzung eines CMOS-Prozesses um die Erzeugung dreidimensionaler Elektrodenarrays verbleiben davon die beiden letzten Masken (W und V). Kann ein Fotonegativlack für die Erzeugung der Dicklackschicht eingesetzt werden, eröffnet sich die Möglichkeit, eine der beiden Masken einzusparen<sup>12</sup>, da mit einem Fotonegativlack Öffnungen im Lack erzeugt werden können, die sich im Gegensatz zu einem Positivlack mit zunehmender Tiefe verbreitern.

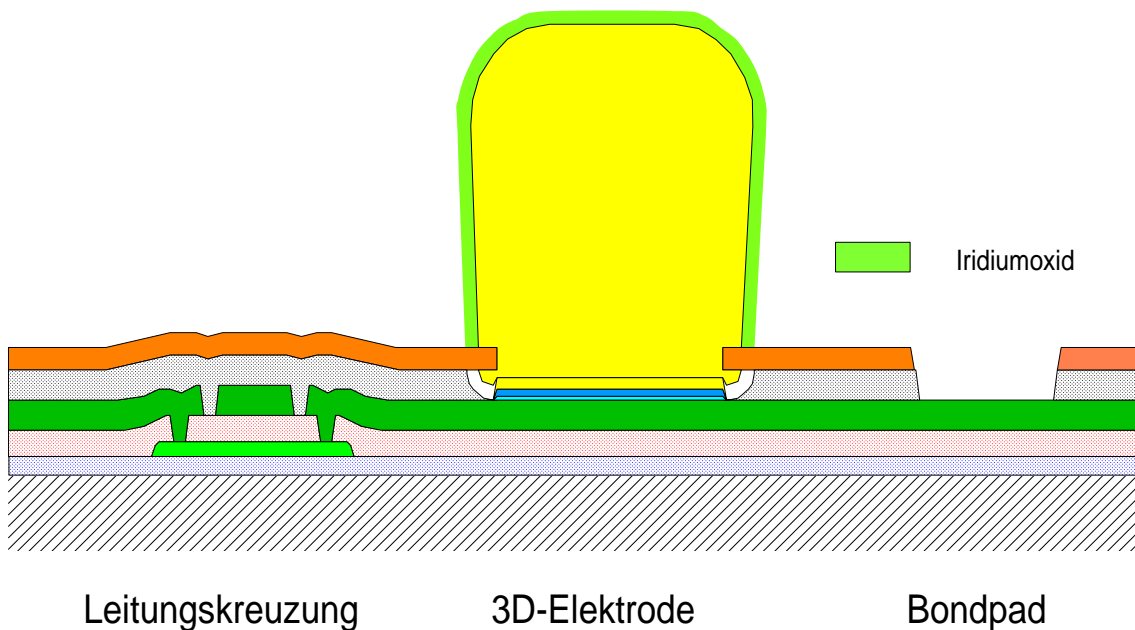


Abb. 4.13: Nach Verrunden der Goldelektroden und Abscheiden der Iridiumschicht

<sup>12</sup>Beide besitzen die gleichen Strukturen mit leicht differierenden Abmessungen

### 4.2.3 Die Erzielung großer Elektrodenhöhen mittels Galvanik

#### Die Herstellung hoher Fotolackschichten

Die Formgebung der dreidimensionalen Elektroden wurde durch Aufbringen und lithographischer Strukturierung einer dicken Fotolackschicht ermöglicht. Ein viskoser Fotolack vom Typ Hoechst AZ4562 wurde in einem Spin-Coating Verfahren bei niedriger Rotationsgeschwindigkeit in Dicken von 23 bis 33 Mikrometern pro Aufschleudervorgang aufgetragen. Durch mehrmalige Wiederholung wurden so Dicken von über  $100\mu\text{m}$  erreicht. Aufgrund der hohen Schichtdicken bilden sich am äußeren Rand an der Grenze der Randentlackung wulstartige Verdickungen aus, die einen guten Hartkontakt der Masken verhindern. Zur Behebung wurde anstelle der konstant breiten Randentlackung die Breite von Aufschleudervorgang zu Aufschleudervorgang variiert.

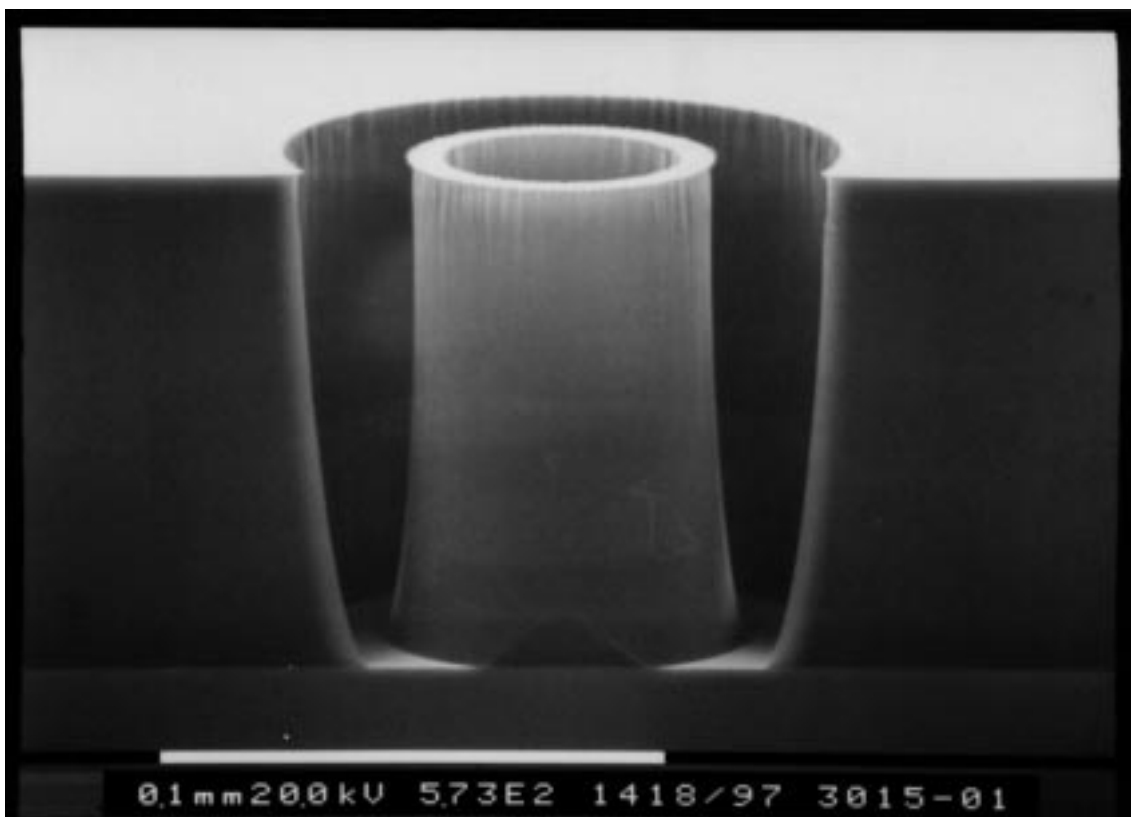


Abb. 4.14: Schnitt durch eine Ringelektroden-Fotolackform

Nach der Bestimmung geeigneter Temperaturbedingungen konnten diese Lackdicken in einem einzigen Schritt von bis zu 10 Minuten Dauer belichtet werden<sup>13</sup>. Die Belichtung erfolgte auf einem Kontaktbelichter für 1:1-Masken der Firma SÜSS. Abb. 4.14 zeigt einen Schnitt durch eine etwa  $83\mu\text{m}$  dicke Fotolackschicht mit angeschnittener Ringelektrodenform. Es wurden Kantensteilheiten von etwa  $88.5^\circ$  erreicht, so daß sich ein Aspektverhältnis von 6:1 erzielen ließ.

<sup>13</sup>Das ist notwendig, da der bereits entwickelte Lack nicht mehr fotoempfindlich ist.

## Die Goldgalvanik

Für die Erzeugung hoher Elektroden aus Gold wurde ein kommerzieller Goldelektrolyt des Typs BDT 200 der Firma Blasberg<sup>14</sup>, Solingen, gewählt. Er zeichnet sich durch den Verzicht auf Cyanide aus, die die Handhabung aufgrund von Sicherheitsmaßnahmen erschweren. Das Gold ist statt dessen in einem Sulfito-Komplex gelöst, aus dem es sich in einer Reinheit von 99,9% in Schichtdicken über 50  $\mu\text{m}$  elektrolytisch abscheiden läßt [Bla97]. Je nach zu erreichender Schichthöhe liegt die Dauer der Abscheidung im Bereich einiger Stunden. Die Geschwindigkeit des Schichtwachstums wird dabei auch von der dem Elektrolyten exponierten Fläche bestimmt. So beobachtet man in engeren Öffnungen im Photolack (zur Herstellung schmaler Elektroden) eine höhere Aufwachsrate, als in breiteren Öffnungen. Daher kann bei schmalen Photolacköffnungen das Gold bereits über den oberen Rand des Photolacks hinausgewachsen sein (die bereits erwähnten pilzähnlichen Strukturen), während in größeren Öffnungen die Oberkante noch nicht erreicht ist. Eine deutliche Verminderung dieses Effekts kann durch der Abscheidung mit Pulsströmen anstelle eines konstanten Stroms erzielt werden (s. dazu [Fri]). Gepulste Ströme liefern gleichmäßigere Aufwachsraten durch die Beeinflussung der Diffusionsverhältnisse in unmittelbarer Oberflächenähe, wo die Abscheidung erfolgt.

Während in der industriellen Galvanik möglichst glatte Oberflächen der galvanisch erzeugten Schichten angestrebt werden, kann eine rauhe Oberfläche der abgeschiedenen Schichten auf Elektroden, die zur Stimulation dienen sollen, durchaus vorteilhaft sein. Einerseits besitzt eine solche Oberfläche eine größere effektive Fläche, so daß Elektroden mit niedrigerer Impedanz bei gleichen geometrischen Abmessungen erzeugt werden können. Andererseits beschränkt sich die Rauigkeit auf die obere Fläche der Elektroden, während die seitlichen Flächen durch die Begrenzung durch den Photolack glatt sind. Dadurch tritt ein vergleichsweise größerer Strom bei der Stimulation am oberen Ende der Elektrode in das Gewebe über, als an den seitlichen Flächen. Das vermindert so unerwünschte Querströme, die am zu stimulierenden Gewebe vorbeifließen.

Die Abbildungen 4.15 und 4.16 zeigen REM-Aufnahmen von Elektroden nach erfolgter Goldgalvanik. Die zylinderförmige Elektrode besitzt einen Durchmesser von 30  $\mu\text{m}$  bei einer Höhe von etwa 100  $\mu\text{m}$ . Die Ringelektroden des  $2 \times 2$ -Arrays haben einen Außendurchmesser von 180  $\mu\text{m}$  mit einer Ringstärke von 25  $\mu\text{m}$  und einem Durchmesser der Kreiselektrode von 72  $\mu\text{m}$ . Die Verjüngung am oberen Ende der Elektroden resultiert offenbar aus einem Quellen des Fotolacks im Verlauf der Galvanik. Die Ursache dafür ist die durch die zu erzielende Schichthöhe bedingte lange Verweildauer im Galvanikbad. Die cyanidbasierten Goldgalvaniken zeigen deutlich höhere Aufwachsraten und können, trotz der benannten kritischeren Handhabung, als Alternative bei geforderter hoher Formtreue dienen.

Eine Anordnung von Elektroden im Array zeigen die die Abbildungen 4.17 und 4.18. Die Aufnahmen zeigen die Elektrodenarrays nach erfolgter Goldgalvanik und Ablösen der hohen Fotolackschicht für die Galvanoformung. Das anschließende Sägen des Wafers vereinzelt die Arrays und trennt sie von den zwischen den Arrays verlaufenden breiten Leiterbahnen zur Randkontaktierung. Die Höhen der Elektroden betragen bei beiden Bildern etwa 100  $\mu\text{m}$ .

---

<sup>14</sup>jetzt Enthone-OMI

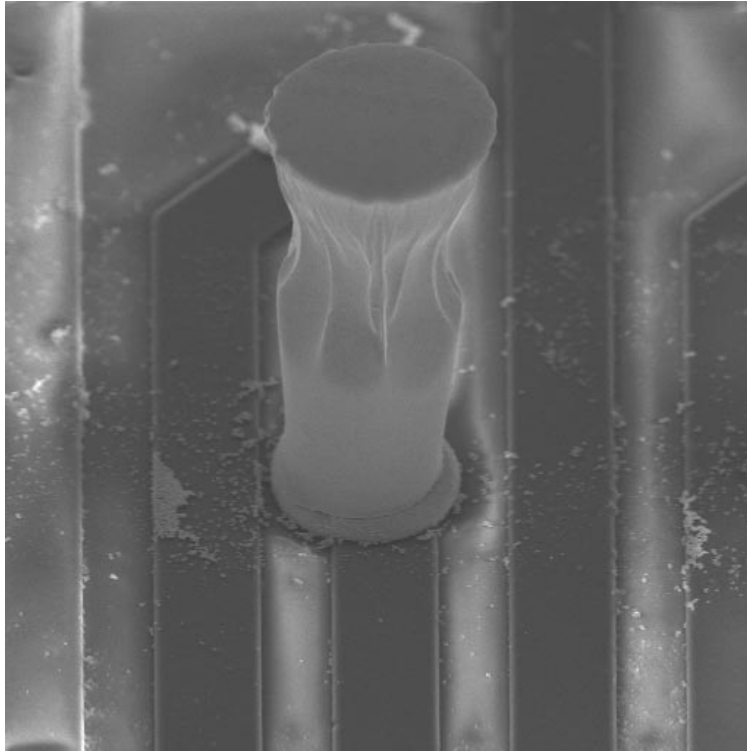


Abb. 4.15: REM-Aufnahme einer Zylinder-Elektrode (Höhe:  $100\ \mu\text{m}$ ,  $\text{Ø}$ :  $30\ \mu\text{m}$ )

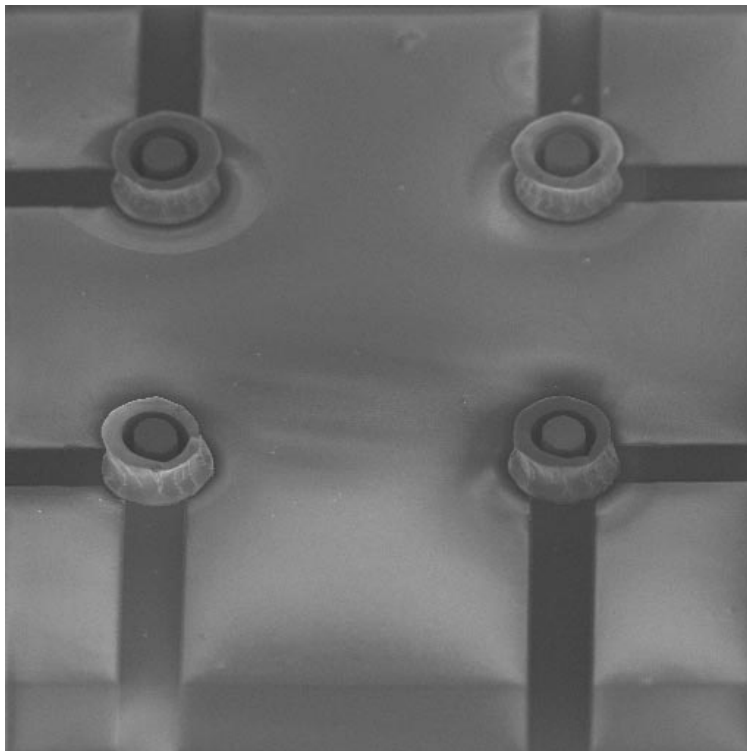


Abb. 4.16: Ein Array aus vier Ringelektroden (Höhe:  $100\ \mu\text{m}$ ,  $\text{Ø}$ :  $180\ \mu\text{m}$ )

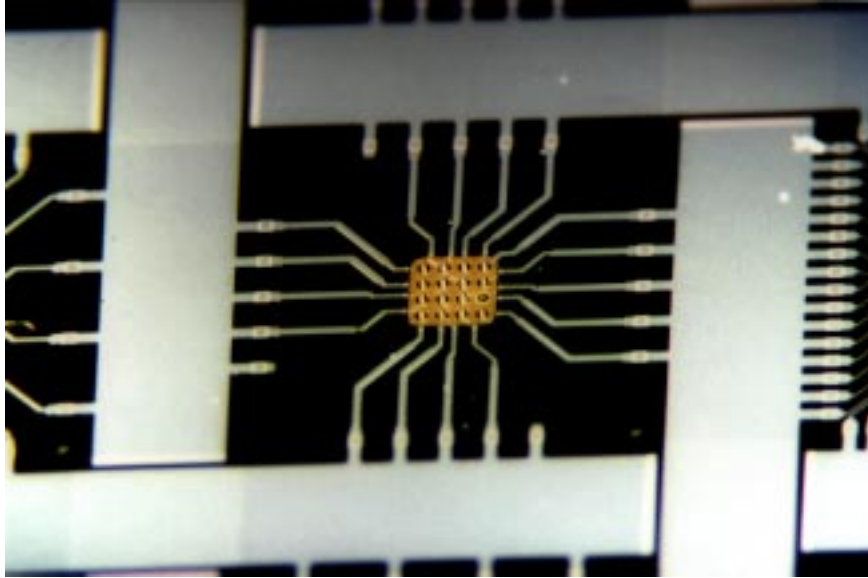


Abb. 4.17: Schrägaufsicht auf ein 4×4-Elektrodenarray mit umgebender, großflächiger Gegenelektrode

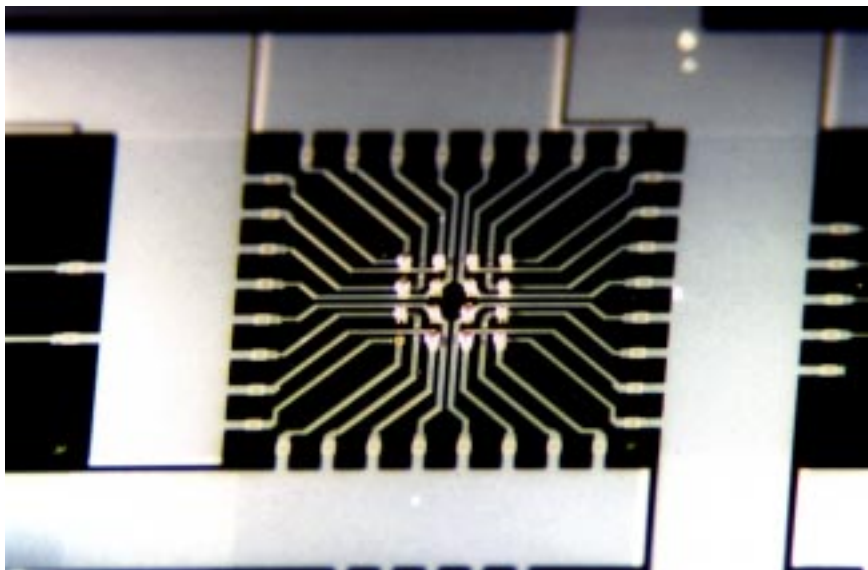


Abb. 4.18: Schrägaufsicht auf ein 4×4-Ringelektrodenarray

## Die Iridiumgalvanik

Die galvanische Abscheidung von Iridium fand nie größere Verbreitung. Seinen günstigen, da chemisch inerten Eigenschaften stehen hohe Materialkosten und nicht unkritische Abscheidebedingungen gegenüber. Eine Häufung der Arbeiten zur galvanischen Abscheidung von Iridium findet sich in den sechziger Jahren.

MacNamara [Mac62], Tyrell [Tyr65] und Conn [Con65] berichten von Abscheidungen aus wässrigen Elektrolyten, Andrews *et al.* [A<sup>+</sup>67] zusätzlich noch von einer Iridiumgalvanik in flüssigem Natriumcyanid-Salz.

Erst in neuerer Zeit besteht mit der Kenntnis um die guten Eigenschaften als Elektrodenmaterial ein erneutes Interesse an einer Iridiumgalvanik [Mei92]. So finden sich in aktuellen Artikeln der Bezug zur Anwendung von Iridium als Stimulationselektrodenmaterial. Fröhlich *et al.* [F<sup>+</sup>96] beschreibt einen Elektrolyten mit Iridium in einem Oxalat-Komplex, Blau *et al.* [B<sup>+</sup>97] eine Badzusammensetzung auf Basis von Hexachloriridat in HCl und K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Für die Bedeckung der Goldelektroden wurde eine Badzusammensetzung gewählt, die sich an der von Fröhlich beschriebenen orientiert. Der Iridiumgehalt des Elektrolyts beträgt 5g pro Liter. Dazu wurde Iridium-IV-Chlorid-Hydrat der Firma Chempur, Karlsruhe, in deionisiertem Wasser gelöst. Zur Bildung des Oxalat-Komplexes wurde Oxalsäure zugesetzt und der pH-Wert der Lösung auf 10 eingestellt. Als Anodenmaterial dienten Titanbleche. Die Eignung von Gold als Saatschicht für galvanisch abgeschiedenes Iridium ist seit den früheren Veröffentlichungen (s. o.) bekannt. Die Stromdichte wurde wie bei Fröhlich auf 5 A/dm<sup>2</sup> und eine Puls-/Pausendauer von 0,2/3,0 Sekunden vorgegeben. Auf Testsubstraten aus goldbedampften Siliziumwafer-Stücken, konnten so metallisch glänzende Iridiumschichten erzeugt werden (s. a. [Fri]).

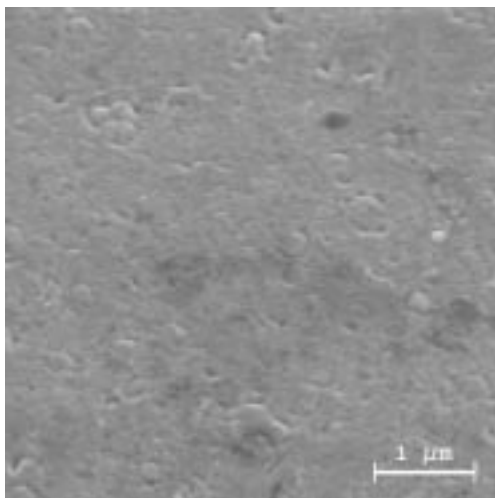


Abb. 4.19: Eine Iridiumschicht auf aufgedampftem Gold

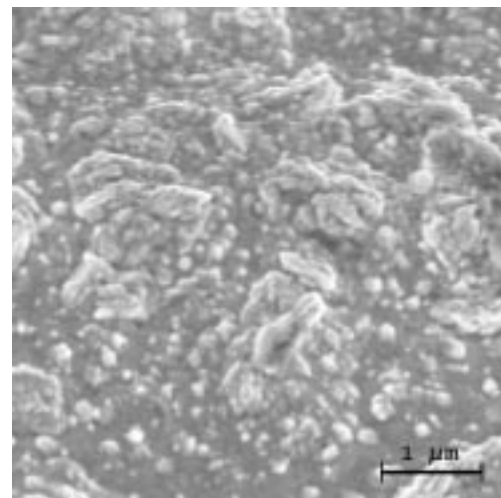


Abb. 4.20: Eine Iridiumschicht auf galvanischem Gold

Neben aufgedampften Goldschichten als Saatschicht wurde auch die Eignung von galvanisch erzeugten Goldschichten überprüft. Abb. 4.19 zeigt eine REM-Aufnahme einer dünnen Iridiumschicht auf einer aufgedampften Goldschicht. Im gleichen Abbildungsmaßstab zeigt Abb. 4.20 eine dünne Iridiumschicht auf einer rauhen, galvanisch erzeugten Goldschicht. Beide Goldoberflächen befanden sich auf einem einzigen Substrat, so daß die Iridiumgalvanik gleichzeitig und damit unter gleichen Bedingungen erfolgen konnte. Aufgrund der niedrigen Schichtdicke des Iridiums wird die darunter liegende Topographie des Goldes deutlich abgebildet.