

Sensorik und Sensorsysteme (TU Wien)

Omar Filip El Sendiouny
`e1616023@student.tuwien.ac.at`

28. Oktober 2024

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

Was beigebracht wird...

1 Physical Vapour Deposition

PVD (Physical Vapour Deposition) umfasst alle **physikalischen Verfahren zur Abscheidung dünner Schichten aus der Dampfphase**. Dabei werden die Ausgangsmaterialien der Schichten durch physikalische Prozesse wie Erhitzen in die Dampfphase überführt und anschließend auf dem Zielobjekt abgeschieden. Die **typischen Schichtdicken** liegen **zwischen 1 nm und 1 μm** und können **in Ausnahmefällen bis zu 10 μm** erreichen [?].

1.1 Begriffsklärung für PVD

- **Monolage:** Eine Monolage (auch Monoschicht genannt) beschreibt eine Schicht, die nur aus einer einzelnen Lage von Atomen oder Molekülen besteht [?].
- **Freie Weglänge:** Der Abstand, den die Atome oder Moleküle in der Dampfphase von der Verdampfungsquelle bis zum Substrat zurücklegen müssen, bevor sie auf diesem abgeschieden werden [?].
- **Verdampfen:** Bezeichnet den Übergang eines Stoffes vom flüssigen in den gasförmigen Zustand [?].
- **Sublimieren:** Beschreibt den direkten Übergang eines Stoffes vom festen in den gasförmigen Zustand, ohne eine flüssige Phase zu durchlaufen [?].
- **Rezipient:** Vakuumkammer [?, ?].
- **Substrat:** Trägerschicht in der Mikroelektronik und Halbleiterfertigung. Der Begriff Substrat bezieht sich allgemein auf das Material oder die Oberfläche, auf der ein Herstellungs- oder Beschichtungsprozess stattfindet [?].
- **Wafer:** Dünne Scheibe aus einem Halbleitermaterial, wie z.B. Silizium, und dient als Substrat [?].
- **Tiegel:** Ein Behälter, in dem das Aufdampfmaterial lokal geschmolzen wird, häufig aus Materialien wie Graphit, Keramik oder Wolfram, die hohen Temperaturen standhalten [?, ?]. Beim Elektronenstrahlverdampfen (E-Beam-Verfahren) wird das Aufdampfmaterial im Tiegel erhitzt und verdampft, ohne dass der gesamte Tiegel erhitzt werden muss [?]. Siehe ?? b), c) und d).
- **Schiffchen:** Ein kleiner, meist bootförmiger Behälter (daher der Name), der ebenfalls zur Aufnahme des Aufdampfmaterials dient, jedoch direkt beheizt wird, häufig durch Widerstandsheizung. Schiffchen bestehen oft aus Materialien wie Molybdän oder Wolfram, da sie hohe Temperaturen aushalten können [?, ?]. Siehe ?? und ?? a).

1.2 PVD-Verfahren

Die verschiedenen PVD-Verfahren **unterscheiden sich hauptsächlich in der Methode zur Erzeugung des Dampfstrahls** [?]:

1. **Thermisches Verdampfen**
2. **Sputtern (Zerstäubung)**
3. **Laserstrahlverdampfen (pulsed laser deposition, PLD)**
4. **Molekularbeamepitaxie (MBE)**

1.3 Thermisches Verdampfen (Aufdampfen)

Das thermische Aufdampfen gehört zu den ältesten Methoden zur Herstellung dünner Schichten (??). Dabei wird das **Material der Aufdampfquelle auf** eine Temperatur von **500 bis 3000 °C erhitzt**, bis es einen ausreichend hohen Dampfdruck¹ entwickelt [?].

Meist schmilzt das Material dabei, doch einige Stoffe, wie beispielsweise Chrom, erreichen bereits vor dem Schmelzpunkt einen ausreichend hohen Dampfdruck und sublimieren, indem sie direkt aus dem festen Zustand verdampfen [?].

Der **entstehende Dampf** breitet sich aus und **kondensiert an** allen **kälteren Oberflächen** in der Vakuumkammer, **einschließlich des Substrats**. Der Prozess findet im **Vakuum bei Drücken** von typischerweise **unter 10^{-6} mbar** statt [?].

Dabei ist die **freie Weglänge der Teilchen deutlich größer als** die **Distanz zwischen der Aufdampfquelle und dem Substrat**. Dies führt dazu, dass die **Teilchen nur selten mit dem Restgas kollidieren und sich geradlinig von der Quelle zum Substrat bewegen** [?].

Die **kinetische Energie der Teilchen, die auf der Substratoberfläche kondensieren**, beträgt etwa **0,1 bis 0,5 eV**, was im Vergleich zum Sputtern (mit 0 bis 100 eV) **sehr gering** ist [?].

1.3.1 Funktionsweise

Basierend auf ?? wird im Folgenden die Funktionsweise dieses Verfahrens erläutert [?]:

1. **Vakuum:** Im Rezipient wird mit dem Pumpsystem ein Vakuum erzeugt.
2. **Aufheizen:** Das Aufdampfmaterial wird auf eine Temperatur von 500 bis 3000 °C erhitzt.
3. **Öffnen des Shuttters:** Sobald ein ausreichend hoher Dampfdruck erreicht ist, wird der Shutter weggeschwenkt, um die Bedampfung des Substrats zu ermöglichen. Wird der Shutter zu früh geöffnet oder ist er während des Aufheizens nicht vorhanden, kann es zu einer ungleichmäßigen Abscheidung kommen bzw. es können unerwünschte Oxide des Aufdampfmaterials auf das Substrat abgeschieden werden. Der Weg der Teilchen zum Substrat wird daher durch ein Schirmblech (Shutter) blockiert.
4. **Abscheidung am Substrat:** Das Aufdampfmaterial kondensiert nun mit einer konstanten Rate sowohl auf dem Substrat als auch auf dem Schwingquarz. Der Schwingquarz dient zur Messung der Schichtdicke, indem Änderungen seiner Resonanzfrequenz erfasst werden.

1.3.2 Schichtdickenmessung

Zur Messung der Schichtdicke wird ein **piezoelektrisches Schwingquarzplättchen** verwendet, das **nahe² am Substrat positioniert** ist. Durch Anlegen einer Wechselspannung wird das Quarzplättchen in eine (Scher-)Schwingung versetzt. Wenn das **Aufdampfmaterial auf dem Quarz kondensiert** und seine Masse zunimmt, **sinkt die Resonanzfrequenz** des Quarzes. Diese Abnahme der Frequenz ist **proportional zur Dicke der abgeschiedenen Schicht** und dient als

¹Ein hoher Dampfdruck ist beim Aufdampfen entscheidend, da er sicherstellt, dass genügend Atome oder Moleküle des Materials in die Gasphase übertreten und eine dampfartige Wolke bilden. Diese Wolke ermöglicht eine ausreichende Partikelzufuhr zum Zielsubstrat, wodurch sich eine gleichmäßige, dünne Schicht bildet. Bei zu geringem Dampfdruck wären nur wenige Teilchen verdampft, was zu einer ungleichmäßigen und ineffizienten Beschichtung führen würde.

²Da Schwingquarz und Substrat unterschiedliche Abstände zur Aufdampfquelle haben und sich zudem unterschiedlich nah an der Achse des Aufdampfstrahls befinden, ergeben sich unterschiedliche Aufdampfraten. Diese Abweichungen werden durch einen experimentell zu bestimmenden Geometriefaktor (Tooling-Factor) korrigiert.

images/PVD_Aufdampfanlage.png

Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer PVD Aufdampfanlage [?]

Messgrundlage. Die Resonanzfrequenz startet typischerweise bei etwa 5 MHz und sollte, wenn sie auf 4 MHz fällt, zum Austausch des Quarzplättchens führen, um präzise Messwerte sicherzustellen [?].

1.3.3 Erwärmung mittels Elektronenstrahlquelle (E-Beam-Verfahren)

Bei dieser Methode wird ein **Elektronenstrahl gezielt auf einen kleinen Bereich des Aufdampfmaterials fokussiert**, sodass das Material **lokal aufgeschmolzen** wird, während der Großteil fest bleibt (?? b), c) und d)). Der **Tiegel selbst** wird dabei **nicht auf hohe Temperaturen erhitzt**, was das **Risiko einer Kontamination durch das Tiegelmateriale verringert und höhere Arbeitstemperaturen** als bei herkömmlichen Quellen, wie Schiffchenquellen, ermöglicht (?? a)). Um eine **effektive Wärmeableitung** sicherzustellen, besteht der **Tiegel aus Kupfer** und wird **direkt vom Kühlwasser durchströmt**. Das **Aufdampfmaterial** muss **leitfähig** sein, da sich andernfalls elektrische Ladungen ansammeln könnten, die den Elektronenstrahl ablenken könnten [?].

Ein **Permanentmagnet in der Nähe der Elektronenstrahlquelle lenkt den Strahl um 270° ab**, sodass die **Quelle selbst nicht beschichtet wird** (?? b) und c)). Die **Steuerung des Systems** ermöglicht zudem ein **Fokussieren oder Defokussieren des Strahls**, eine **prä-**

zise Positionierung über Spulen sowie eine **kontrollierte Leistungsanpassung** bis zu 5 kW. Durch ein leichtes Wobbeln des Strahls kann ein größerer Bereich des Aufdampfmaterials überstrichen werden, was zu einem gleichmäßigen Erhitzen führt [?].

images/Tiegel und Schiffchen.png

Abbildung 2: a) Aufdampfschiffchen, mit Aluminiumoxid (milchige Bereiche) beschichtet, um das Benetzen durch das Aufdampfmaterial zu minimieren. b) Schematischer Aufbau einer Elektronenstrahlquelle: S...Spule, A...Anode, K...Kathode, W...Wehneltzylinder, T...Tiegel mit Aufdampfmaterial, L...Wasserkühlung, M...Permanentmagnet. c) Elektronenstrahlquelle im Inneren der Vakuumkammer (Rezipient). d) Vierlochtiegel für die Elektronenstrahlquelle, der Beschichtungen aus bis zu vier verschiedenen Materialien ermöglicht [?].

2 Chemical Vapour Deposition

Hier kommt der Hauptinhalt. L^AT_EX ist sehr leistungsfähig für die Erstellung wissenschaftlicher Dokumente.

3 Lithographie