

3.7 Spektroskopische Methoden

An spektroskopischen Methoden sind in der verwendeten MBE-Anlage nur ein sich im Aufbau befindliches Kerrspektrometer und ein Augerelektronenspektrometer vorhanden. Auf das Kerrspektrometer wird hier nicht weiter eingegangen, es wird zur Messung der Kerrrotation in Abhängigkeit eines äußeren Magnetfeldes genutzt. Hier von Interesse ist die Augerelektronenspektroskopie, da diese als einzige in dieser Arbeit verwendete Methode element-spezifisch ist.

3.7.1 Augerelektronenspektroskopie (AES)

Die erste Beobachtung und korrekte Interpretation von Augerelektronen geht auf Pierre Auger im Jahr 1925 zurück [Auger1925]. Seine Untersuchungen begründeten die Augerelektronenspektroskopie (AES), die heute eine Standardmethode zur Analyse der chemischen Zusammensetzung von Oberflächen ist. Die Oberflächensensitivität der Methode ist durch die maximale Austrittstiefe der Augerelektronen gegeben. Die maximale Austrittstiefe lässt sich mit der Universalkurve für die mittlere freie Weglänge [Zangwill1996] bestimmen. Im Mittel beträgt sie zwischen 10 Å und 30 Å.

Beim Augerprozess werden Atome durch einen einfallenden Elektronenstrahl oder Röntgenstrahl ionisiert. Bei letzterem spricht man auch von XAES. Da in der vorliegenden Arbeit die Ionisation mittels Elektronen stattfand, ist die folgende Betrachtung auf diesen Fall beschränkt. Der Elektronenstrahl muss ausreichend Energie besitzen, um kernnahe Elektronen aus dem Atom zu entfernen. In der Regel werden dafür Energien zwischen 3 keV und 5 keV verwendet. Nach dem Herauslösen eines kernnahen Elektrons (z.B. aus der K-Schale) wird das Loch mit einem Elektron aus einer höher liegenden Schale gefüllt (z.B. L_1 -Schale). Die bei diesem Relaxationsprozess freiwerdende Energie ($E_K - E_{L_1}$) kann einerseits durch ein emittiertes Photon ($h \cdot \nu = E_K - E_{L_1}$) abgegeben werden (Röntgen-Fluoreszenz). Andererseits kann die Energie durch einen strahlungslosen Prozess (über die elektronische Wechselwirkung der Elektronen) auf ein Elektron der gleichen oder einer höher liegenden Schale übertragen werden das dann emittiert wird (Augerprozess), sofern seine Bindungsenergie (E_B) kleiner ist als ($E_K - E_{L_1}$). Der Prozess wird beispielhaft für einen KLL-Prozess in Abb. 3.7.1.1 anschaulich dargestellt. Die unterschiedliche Darstellungsweise in a) und b) hat keine Auswirkung auf die Aussage. Während a) anschaulich den Prozess im Atommodell zeigt, sind in b) die Energieniveaus abgebildet. Die Röntgenfluoreszenz und der Augerprozess sind miteinander konkurrierende Prozesse. Welcher wie stark ausgeprägt ist, hängt von der Kernladungszahl Z und dem Zustand E_K des im ersten Prozess entfernten

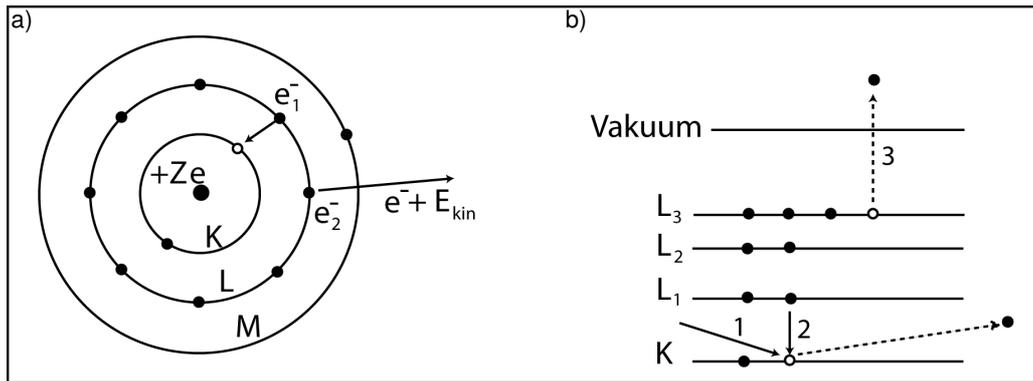


Abb. 3.7.1.1

Schematische Darstellung des Augerprozesses. Die Abbildungen a) und b) sind äquivalent in ihrer Aussage, sie stellen nur zwei unterschiedliche Blickrichtungen dar. Löcher werden durch offene Kreise, Elektronen durch gefüllte Kreise symbolisiert.

- Das durch Elektronenbeschuss erzeugte Loch in der K-Schale wird mit einem Elektron aus der L-Schale (e_1) gefüllt. Die freiwerdende Energie wird strahlungslos an das Elektron e_2 abgegeben. Dieses verlässt das Atom mit einer charakteristischen Energie.
- In dem mit 1 bezeichnetem Prozess wird ein K-Schalenelektron entfernt. Im Schritt 2 relaxiert ein Elektron aus der L_1 Schale in die K-Schale. Im dritten Schritt wird ein Elektron aus der $L_{2,3}$ -Schale emittiert, nachdem die Energie strahlungsfrei auf dieses übertragen wurde.

Elektrons ab. Bei Atomen, bei denen E_K in der K-Schale liegt und mit $Z < 30$ überwiegt der Augerprozess, bei $Z > 60$ ist die Röntgenfluoreszenzausbeute größer als 90%.

Zur Interpretation der Augerspektren werden Nachschlagewerke verwendet, wie zum Beispiel [Davis1976]. Dort finden sich auch die Daten, die später zur Kalibrierung der Bismutschichtdicke verwendet wurden.

Zur Dickenkalibrierung ist es notwendig die verschiedenen Wachstumsmodi zu betrachten. Für die unterschiedlichen Modi ergeben sich verschiedene Verläufe für die Abhängigkeit der Augerintensität von der Schichtdicke. In Abb. 3.7.1.2 sind diese für die drei gängigen Modi dargestellt. Die Skizze orientiert sich an den Darstellungen in [Lüdt1998].

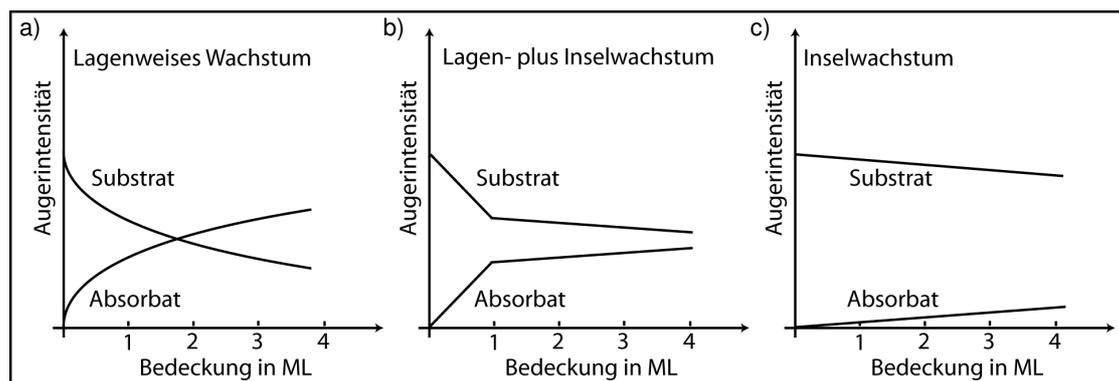


Abb. 3.7.1.2

In der Abbildung wird der Verlauf der Augerintensität jeweils für das Substrat und das Adsorbat (deponiertes Material) in Abhängigkeit von der Dicke des Adsorbats in ML skizziert.

- Für lagenweises Wachstum (Frank-van-der-Merwe-Wachstum).
- Für Lagen- und Inselwachstum (Stranski-Krastanov-Wachstum).
- Für Inselwachstum (Volmer-Weber-Wachstum).

Für die Kalibrierung der Bismutschichtdicke mit dem AES wurde als Vereinfachung angenommen, dass das Wachstum lagenweise stattfindet. Dies ist nicht ganz korrekt, führt aber wie man in Abbildung 3.7.1.2 erkennen kann, nur zu einer Unterschätzung der

Schichtdicke. Für die folgenden Untersuchungen war jedoch nur relevant, dass die Bismutschicht geschlossen ist und somit kein Kontakt zwischen dem Silizium und dem Mangan besteht. Ausgewertet wurde das Verhältnis R der „Peak to Peak“ Intensität des Bi_{101} Signals zur „Peak to Peak“ Intensität des Si_{92} Signals. Um die Apparatur zu kalibrieren wurden Messungen an einer mit 1 ML Bismut bedeckten $\text{Si}(111)$ -Oberfläche vorgenommen. Das System bildet eine stabile $\text{Si}(111)$ - $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})$:Bi Rekonstruktion, wobei an jeder Bismutposition drei Bismutatome vorhanden sind. Es wurde angenommen, dass sich das Verhältnis R durch folgende Funktion beschreiben lässt:

$$R = \frac{I_{\text{Bi}_{101}}^{\infty}}{I_{\text{Si}_{92}}^{\infty}} \cdot \frac{1 - e^{-d/\lambda_{101}}}{e^{-d/\lambda_{92}}} \quad (3.7.1.1)$$

Das unbekannte Verhältnis $\frac{I_{\text{Bi}_{101}}^{\infty}}{I_{\text{Si}_{92}}^{\infty}}$ kann aus den Daten für die bekannte Schicht gewonnen werden. Mit diesen Daten und der mittleren freien Weglänge der Elektronen im Material ($\lambda_{(\text{Bi}_{101})} = 5,6 \text{ \AA}$; $\lambda_{(\text{Si}_{92})} = 5,5 \text{ \AA}$) lässt sich eine Kalibrierungskurve erstellen (s. Abb. 3.7.1.3 a). In Abb. 3.7.1.3 b) wird die Änderung des Augerspektrums für verschiedene Wachstumsstadien beispielhaft dargestellt. Zu beachten sind die unterschiedlichen Dicken für eine

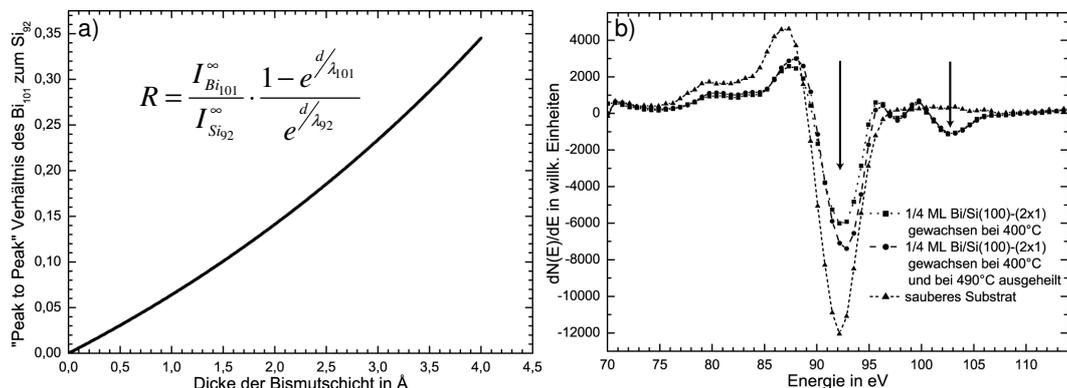


Abb. 3.7.1.3

- Kalibrierungskurve zur Abschätzung von Bismutdicken.
- Veränderung der Augerspektren während der verschiedenen Formierungsstadien der Bismutschicht. Die Pfeile markieren die Signalpositionen bei 92 eV (Si) und 101 eV (Bi).

Monolage Bismut auf $\text{Si}(111)$ ($2,76 \text{ \AA}$) und $\text{Si}(100)$ ($2,41 \text{ \AA}$).

Das in der verwendeten Anlage vorhandene Augerelektronenspektrometer besteht aus einer Elektronenkanone, die die Elektronen zur Ionisation der Probenatome mit 3kV beschleunigt und einem CMA (Cylindrical Mirror Analyzer). Aufgrund des schlechten Signal-zu-Rausch-Verhältnisses wird zur Detektion Lock-In-Technik verwendet. Der genaue Aufbau und Details zum Computerprogramm sind in [Deffke2002] nachzulesen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Veränderungen am Messprogramm vorgenommen, die das Messen komfortabler gestalten.