

## 3.2 Probenpräparation mittels Molekularstrahlepitaxie

Die Entwicklung der Molekularstrahlepitaxie (MBE) ist eng mit der UHV-Technik verknüpft. Eine der ersten Hochvakuumanlagen wurde in den 70er von Jahren Cho und Arthur [Cho1971] verwendet, um GaAs-Schichten mittels MBE herzustellen und zu untersuchen. Seitdem hat diese Technik einen rasanten Fortschritt erlebt.

Mit der MBE-Technik werden Schichten im Ultrahochvakuum (UHV, besser  $10^{-7}$  mbar) hergestellt. Kennzeichnend für die MBE-Technik ist, dass der Massentransport zum Substrat, durch einen Molekularstrahl erfolgt. Dieser kann durch den Einsatz von Elektronenstrahlverdampfern oder Effusionszellen erfolgen. Im ersten Fall wird das Material entweder direkt mit einem Elektronenstrahl beschossen um es zu verdampfen oder das Material befindet sich in einem Tiegel, der durch Elektronenbeschuss geheizt wird. Im zweiten Fall wird ein Tiegel durch eine Heizwendel geheizt. Das UHV ist insofern für diese Technik notwendig, da man reine Schichten herstellen will und ausreichend Zeit benötigt um diese zu untersuchen. Mit der kinetischen Gastheorie erhält man eine Approximation, die besagt, dass bei einem Druck von  $10^{-6}$  mbar und einem Haftkoeffizienten von 1, sich nach etwa einer Sekunde eine Monolage Fremdatome auf der sauberen Oberfläche angelagert hat. Setzt man für eine Versuchsreihe mehrere Stunden an, so wird ersichtlich, warum man einen Basisdruck von  $10^{-10}$  mbar bis  $10^{-11}$  mbar benötigt. Des Weiteren ist eine große mittlere freie Weglänge erforderlich, damit das verdampfte Material ungehindert bis zum Substrat gelangt. Die mittlere freie Weglänge lässt sich wieder mit der kinetischen Gastheorie abschätzen [Herman1996], man erhält:

$$L = 3,11 \cdot 10^{-24} \cdot \frac{T}{p \cdot d^2} [m], \quad (3.2.1)$$

mit T der Temperatur, p dem Kammerdruck und d dem Durchmesser der Atome oder Moleküle. Treffen die verdampften Materialien auf das Substrat, sind kinetische Oberflächenprozesse für das Wachstum verantwortlich. Mit dieser Methode ist es möglich, Materialien mit passender Gitterkonstanten auf einkristallinen Substraten so zu deponieren, dass sich wieder einkristalline Schichten bilden. Auf dem Substrat werden hauptsächlich vier Prozesse beim Aufdampfen beobachtet:

1. Adsorption der verdampften Atome oder Moleküle auf der Oberfläche.
2. Diffusion und Dissoziation.
3. Der Einbau von adsorbierten Atomen oder Molekülen in das Kristallgitter.
4. Thermische Desorption von Atomen oder Molekülen.

Der Anpassungskoeffizient a fasst diese Prozesse zusammen, er ist definiert als:

$$a = \frac{T_V - T_E}{T_V - T_S}, \quad (3.2.2)$$

mit  $T_V$  der Temperatur der Verdampferquelle,  $T_E$  dem Temperaturäquivalent der Energie von der Oberfläche desorbierter Moleküle oder Atome und  $T_S$  der Substrattemperatur.

Maßgeblich für das Kristallwachstum ist die Oberflächendiffusion. Sie fördert neben der Keimbildung auch die Anlagerung weiterer Atome. Eine große Diffusionslänge kann sich aber auch nachteilig auswirken, wenn durch sie unerwünschte Prozesse (z.B. Silizidbildung) gefördert werden. Die Diffusionslänge lässt sich mit der folgenden Formel abschätzen:

$$\lambda_{diff} = a \cdot \sqrt{2 \cdot e^{\frac{E_{ad} - E_{diff}}{2 \cdot k_B T_S}}}, \quad (3.2.3)$$

mit  $a$  der Gitterkonstanten,  $E_{ad}$  der Adsorptionsenergie,  $E_{diff}$  der Diffusionsenergie und  $T_S$  der Substrattemperatur.

Es werden in der Regel drei verschiedene Wachstumsmodi unterschieden. Diese werden in Abbildung 3.2.1 illustriert, die sich an [Kern1979, Herman1996] anlehnt

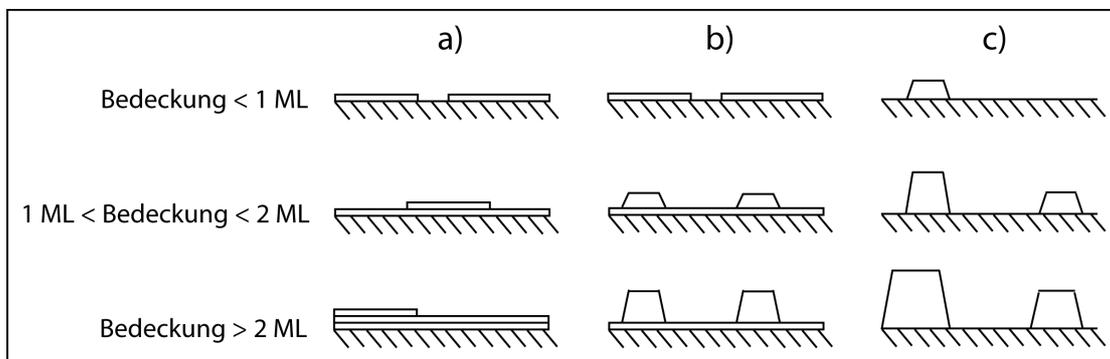


Abb. 3.2.1

Schematische Darstellung der drei Wachstumsmodi für drei verschiedene Bedeckungsgrade.

- Frank-van-der-Merwe-Wachstum (Lagenwachstum).
- Stranski-Krastanov-Wachstum (Insel- und Lagenwachstum).
- Volmer-Weber-Wachstum (Inselwachstum).

In a) ist das lagenweise Wachstum (Frank-van-der-Merwe-Wachstum) dargestellt. Bei diesem Modus ist die Bindungsenergie zwischen dem Substrat und den auftreffenden Atomen oder Molekülen größer als zwischen diesen untereinander. Dies bewirkt, dass sich erst eine geschlossene Schicht bildet, bevor die nächste begonnen wird. Zu finden ist dieses Verhalten vor allem bei Metall - Metall und Halbleiter - Halbleiter-Systemen.

Das in b) dargestellte Wachstumsverhalten stellt eine Mischform aus dem Lagenwachstum und dem Inselwachstum dar (Stranski-Krastanov-Wachstum). Nach dem Abschluss der ersten Lage ist es energetisch günstiger, Inseln auszubilden.

In c) ist das Inselwachstum abgebildet. Grund hierfür ist eine höhere Bindungsenergie zwischen auftreffenden Molekülen oder Atome untereinander als zum Substrat. Dieser Modus wird vielfach beim Wachstum von Metallen auf Isolatoren beobachtet.

Die Schichtdicken wurden mit einem Schwingquarz gemessen, der mittels einer Präzisionswaage (Genauigkeit  $10^{-6}$  g) und dicken Mangan- und Bismutschichten kalibriert wurde. Die Messungen fanden unter Berücksichtigung von Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit statt.