

# Atomlagenepitaxie zur Herstellung von Supergittern und Quantentopfstrukturen

H. Sitter, W. Faschinger, P. Juza, F. Hauzenberger, K. Lischka, A. Pesek, H. Zajicek  
Institut für Experimentalphysik, Forschungsinstitut für Optoelektronik,  
Universität Linz  
4040 Linz

Im vergangenen Seminar wurde über die erfolgreiche Verwendung der Atomlagenepitaxie zur Herstellung von CdTe auf GaAs berichtet. In der Zwischenzeit ist es gelungen, diese Wachstumsmethode auf die Materialien ZnTe, CdSe und ZnSe zu erweitern. Aus diesen Materialien wurden Supergitter und Quantentopfstrukturen hergestellt, wobei die minimale Quantentopfbreite von einer einzigen Monolage aus CdSe erreicht wurde. Die Charakterisierung erfolgte mittels hochauflösender Röntgendiffraktometrie und mit Photolumineszenz.

## 1. Einleitung

Insbesondere in der modernen Nachrichtentechnik hat sich in den vergangenen Jahren die optische Nachrichtenübermittlung durchgesetzt. Bisher basiert diese Technologie auf GaAs-Emittern und GaAs-Detektoren, die im infraroten Spektralbereich arbeiten. Es wäre jedoch aus verschiedenen Gründen wünschenswert, die optische Nachrichtenübertragung im sichtbaren, insbesondere im blauen Spektralbereich durchführen zu können. Auf diesem Gebiet ist in den letzten Jahren ein gewisser Durchbruch mit der Entwicklung des blau emittierenden Lasers, der auf II-VI Verbindungshalbleitern basiert, gelungen. Diese Laser funktionieren derzeit allerdings nur bei tiefen Temperaturen und zeigen noch geringe Lebensdauer. Einer der Gründe für die Degradationserscheinungen sind die Defekte, die an den Zwischenflächen der optoelektronischen Bauelemente eingebaut werden. Es sind daher sehr viele Bemühungen im Gange, diese II-VI Verbindungshalbleiter in hoher Perfektion aufeinander aufzuwachsen und hoch zu dotieren.

Als einer der Möglichkeiten, hochqualitative Epitaxieschichten aus II-VI Verbindungshalbleitern herzustellen, hat sich die sogenannte Atomlagenepitaxie herausgestellt [1]. Im vergangenen Seminar wurden über die Grundlagen der Atomlagenepitaxie und insbesondere über das Wachstum von CdTe auf GaAs berichtet. In der Zwischenzeit wurde die Ultrahochvakuumkammer, in der die Atomlagenepitaxie stattfindet, mit weiteren Effusionszellen ausgestattet. Derzeit ist es möglich, Cd, Te, Zn und Se als Grundmaterialien aufzudampfen und diese Verbindungen mit Lithiumnitrit oder mit Chlor zu dotieren. Im Fall von Se wurde eine spezielle Crackzelle entwickelt, die eine ganz wesentliche Voraussetzung für das erfolgreiche Wachstum von Seleniden darstellt.

## 2. Experimentelle Durchführung

Bei der Atomlagenepitaxie können die Wachstumsparameter, das sind die Substrattemperatur und die Effusionsraten der jeweiligen Effusionszellen so gewählt werden, daß pro Wachstumszyklus eine halbe Monolage des gewünschten Materials aufwächst. Ein derartiger Satz von Wachstumsparametern konnte für CdTe und für ZnTe gefunden werden. Bei einer Substrattemperatur von 280°C konnten daher Supergitterstrukturen aus CdTe und ZnTe hergestellt werden.

Im Fall der Selenide konnte jedoch der alternierende Wachstumsmodus wie er für die Atomlagenepitaxie charakteristisch ist, nicht verwendet werden, da das Selen keine stabile Monolage an der Wachstumsfront ausbildet. Es wurde daher für die Selenide die sogenannte "Self-Limiting Monolayer Epitaxy" (SME) entwickelt [2].

In Abb. 1 ist der Wachstumsmodus für die Molekularstrahlepitaxie, die Atomlagenepitaxie und die selbst limitierende Monolagenepitaxie gegenübergestellt.

Im Fall des MBE-Modus werden beide Konstituenten der Verbindung stets gleichzeitig angeboten. Im Fall der Atomlagenepitaxie werden die beiden Komponenten in alternierenden Wachstumsimpulsen auf der Oberfläche aufgedampft. Hingegen bei der SME wird die sehr flüchtige Komponente kontinuierlich angeboten und nur die Komponente mit dem geringeren Dampfdruck in digitalen Wachstumsimpulsen an der Oberfläche angeboten, sodaß während dieser Zeit jeweils eine bzw. zwei Monolagen der gewünschten Verbindung entstehen.

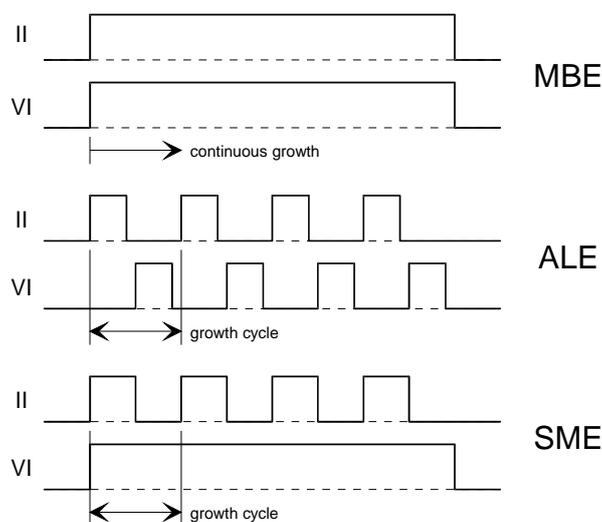


Abb. 1: Zeitlicher Verlauf der Wachstumsimpulse im MBE, ALE und SME-Modus.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. CdTe-, ZnTe-Supergitter

Supergitterstrukturen aus CdTe und ZnTe wurden im Atomlagenepitaxiemodus bei einer Substrattemperatur von 280°C aufgewachsen, wobei pro Wachstumszyklus jeweils eine halbe Monolage des Verbindungshalbleiters aufgewachsen wurde. Es konnte daher aufgrund der Anzahl der Wachstumszyklen eine Supergitterperiode vorherbestimmt werden [3].

In Abb. 2 wird die theoretisch erwartete Supergitterperiode mit der tatsächlich im Experiment festgestellten Supergitterperiode verglichen. Beginnend von der Supergitterstruktur, die jeweils aus zwei Monolagen CdTe und ZnTe besteht, bis hin zum Supergitter, das aus jeweils sechs Monolagen der beiden Verbindungshalbleiter aufgebaut ist, ergab sich ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen den erwarteten und den tatsächlich im Experiment gemessenen Supergitterperioden. Die kristalline Qualität der Supergitterstrukturen wurde mit Hilfe hochauflösender Röntgenbeugung (HRXD) untersucht [4].

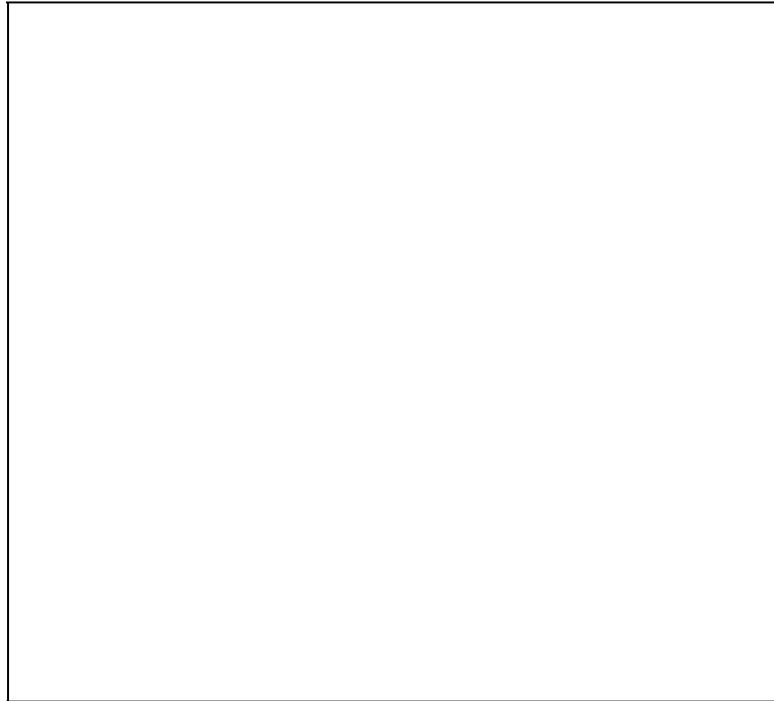


Abb. 2: Vergleich der theoretisch vorhergesagten Supergitterperiode mit der im Experiment gemessenen Supergitterperiode.

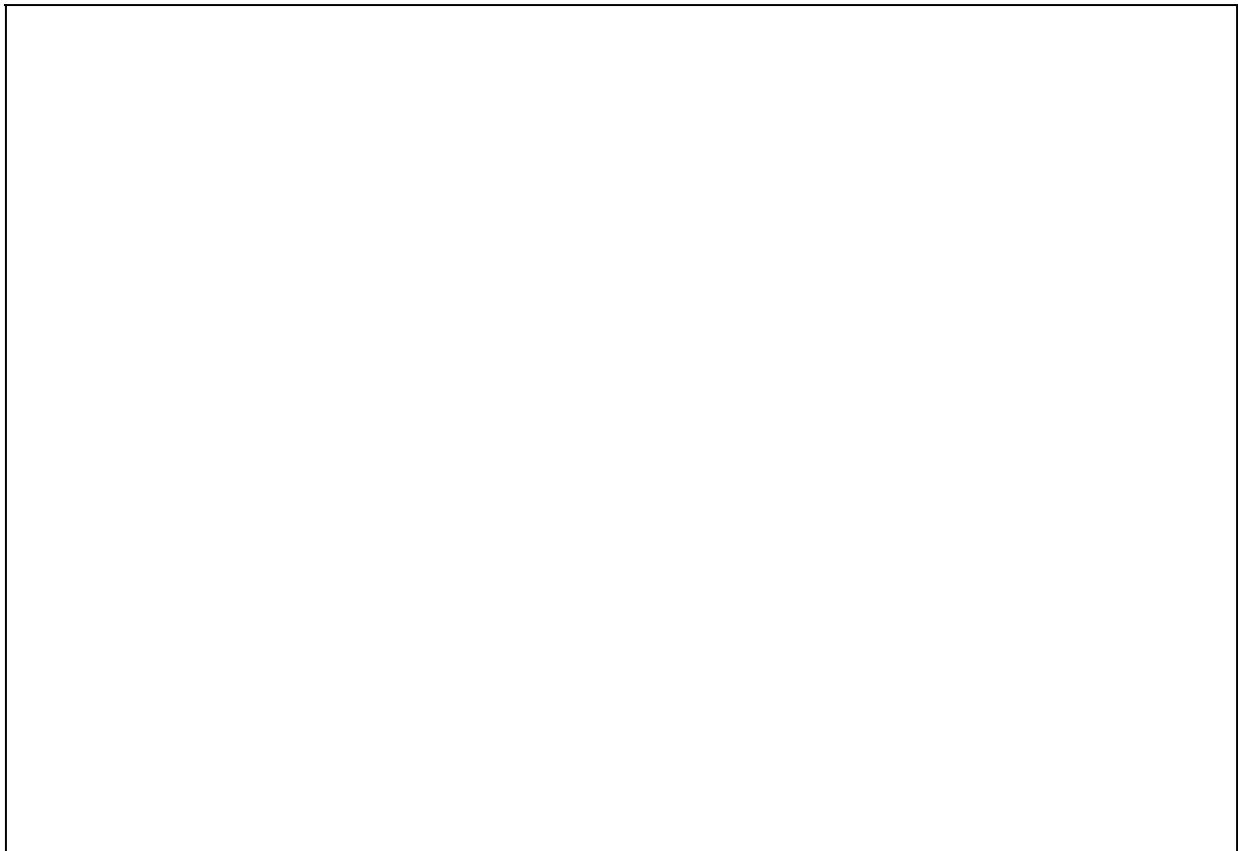


Abb. 3 HRXD-Spektren für CdTe-, ZnTe-Supergitter mit einer Periode von 2+2, bzw. 4+4 Monolagen.

In Abb. 3 werden zwei HRXD-Spektren verglichen, die von einem Supergitter mit 2+2 Monolagen, bzw. von einem Supergitter mit 4+4 Monolagen stammen. Die Reflexe des GaAs-Substrats und der ZnTe-Pufferschicht, sowie der Reflex 0. Ordnung stimmen für beide Supergitter überein. Der Reflex 1. Ordnung des 2+2 Supergitters liegt an der gleichen Stelle wie der Reflex 2. Ordnung des 4+4 Supergitters. Diese gute Übereinstimmung sowie die äußerst geringe Intensität zwischen den Beugungsmaxima höherer Ordnung zeugen von der hohen kristallinen Qualität der hergestellten Supergitter.

### 3.2. ZnSe-, CdSe-Supergitter

ZnSe- und CdTe-Schichten wurden im SME-Modus aufgedampft. Dabei entstanden pro Wachstumszyklus jeweils eine Monolage bzw. zwei Monolagen ZnSe, je nach dem wieviel Zn während des Wachstumsimpulses angeboten wurde [5].

In Abb. 5 ist die gemessene ZnS-Schichtdicke als Funktion der Anzahl der verwendeten ZnSe-Wachstumszyklen aufgetragen worden. Es ergaben sich zwei Wachstumsregime, in denen entweder eine Monolage pro Wachstumszyklus oder zwei Monolagen pro Wachstumszyklus beobachtet wurden.

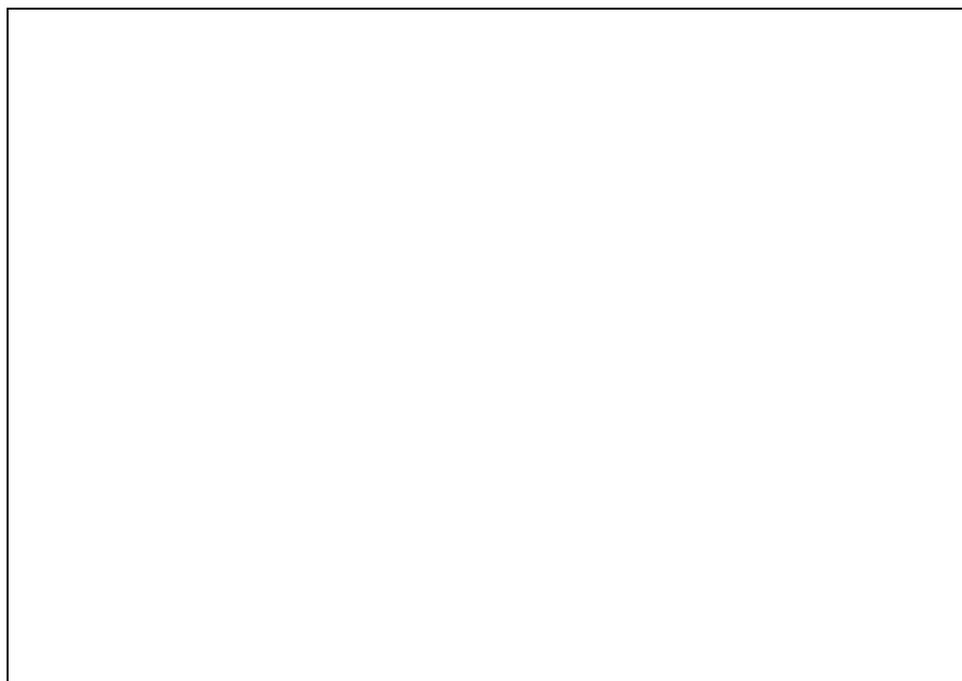


Abb. 4: Schichtdicke der ZnTe-Perioden innerhalb des Supergitters als Funktion der Anzahl der Wachstumszyklen.

Mit Hilfe der SME wurden auch ZnSe-CdSe-Supergitter hergestellt [6]. In Abb. 5 sind die Photolumineszenzspektren der ZnSe-CdSe-Supergitter mit einer Periode von 2+2 Monolagen bis zu einer Periode von 6+6 Monolagen aufgetragen. Das Lumineszenzspektrum des 2+2 Supergitters wird von der exzitonischen Lumineszenz dominiert. Mit zunehmender Supergitterperiode nimmt jedoch die exzitonische Lumineszenz deutlich ab. Hingegen ist eine zunehmende Störstellenlumineszenz zu beobachten. Die Grenze liegt etwa bei 3 Monolagen, was darauf hindeutet, daß bei Supergittern mit größerer Schichtdicke als drei Monolagen, die kritische Schichtdicke bereits überschritten ist und an den Zwischenflächen hohe Dichten von Versetzungen eingebaut werden.

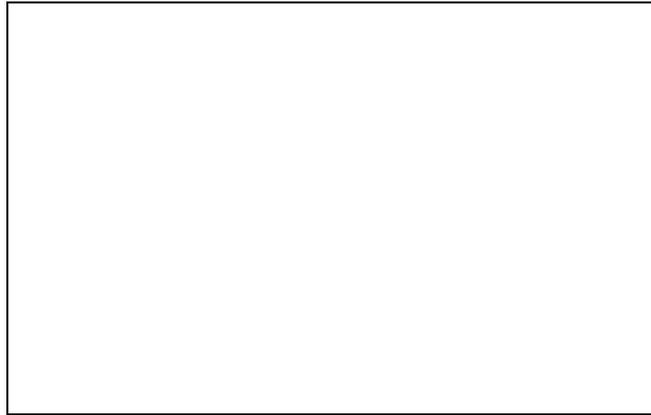


Abb. 5 Photolumineszenzspektren der ZnSe-, CdSe-Supergitter.

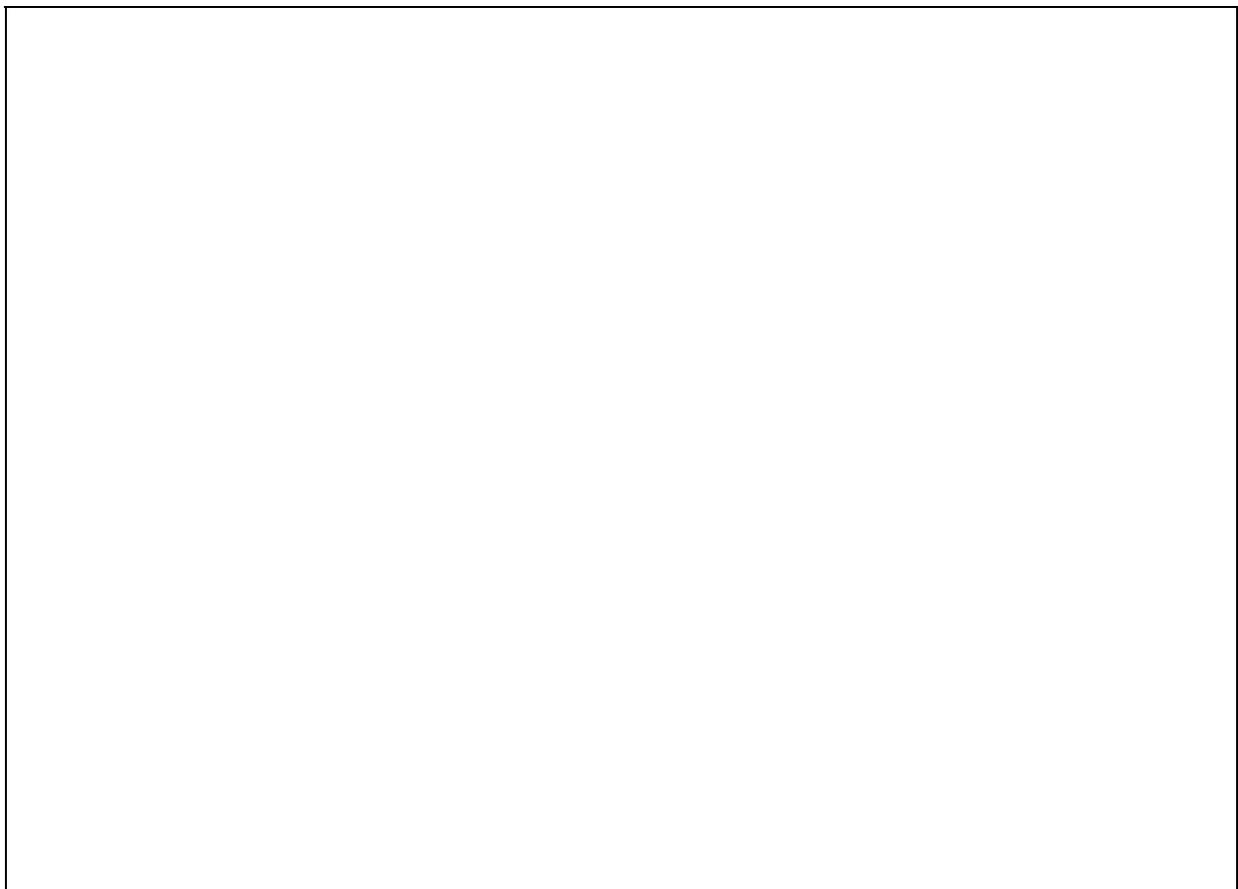


Abb. 6 Photolumineszenzspektren der einzelnen Quantentopfstrukturen mit einer, zwei, bzw. drei Monolagen CdSe.

### 3.3. ZnSe-, CdSe-Quantentopfstrukturen

Mit Hilfe der SME wurden auch einzelne CdSe-Schichten in ZnSe eingebettet. Die so entstandenen Quantentopfstrukturen bestanden aus einer, zwei oder drei Monolagen CdSe [7]. Im Insert der Abb. 6 ist die Schichtstruktur der jeweiligen Proben dargestellt. Auf einem GaAs-Substrat wurde zunächst eine 1  $\mu\text{m}$  dicke ZnSe-Zwischenschicht aufgewachsen, die aufgrund der höheren Wachstumsgeschwindigkeit im MBE-Modus hergestellt wurde. Darauf-

hin wurde auf den SME-Wachstumsmodus umgestellt und ein oder zwei, bzw. drei Monolagen CdSe hergestellt. Als Deckschicht wurde eine 300 Å dicke ZnSe-Schicht verwendet. Die Photolumineszenzspektren der jeweiligen Quantentopfstrukturen sind in Abb. 6 dargestellt. Es ergaben sich jeweils sehr scharfe Lumineszenzlinien, deren energetische Lage sehr gut mit der theoretischen Vorhersage aufgrund der Dicke der Quantentopfstrukturen übereinstimmt.

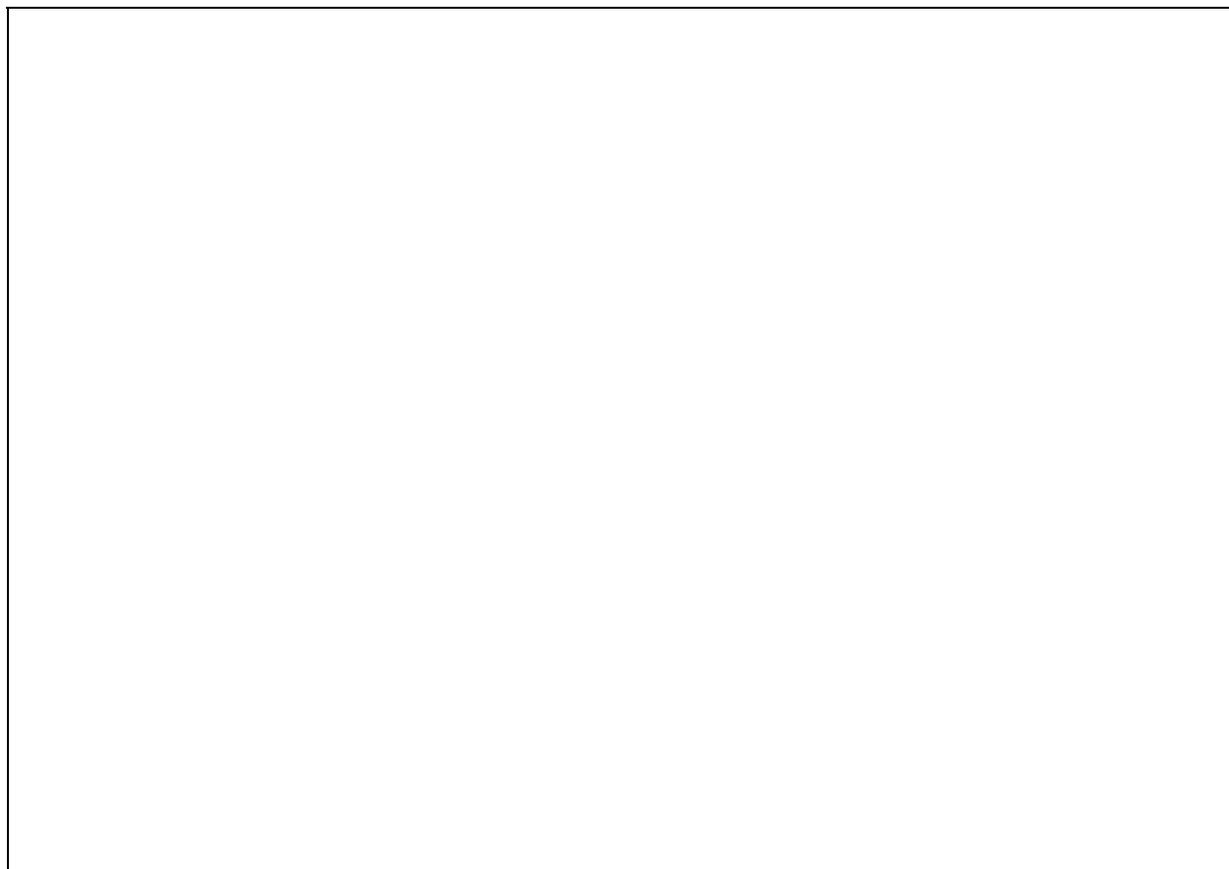


Abb. 7 Photolumineszenzspektrum einer Vielfach-Quantentopfstruktur

In einem weiteren Experiment wurden mehrere Quantentopfstrukturen innerhalb einer Probe aufgewachsen. Die jeweilige Schichtfolge ist als Insert in der Abb. 7 dargestellt. Die Quantentöpfe, die aus einer bis fünf Monolagen CdSe bestanden, wurden jeweils durch 300Å dicke ZnSe-Schichten getrennt. Das von dieser Probe aufgenommene Photolumineszenzspektrum ist in Abb. 7 dargestellt. Es zeigten sich wieder, wie bei den Einzelquantentopfstrukturen, die scharfen Lumineszenzlinien für eine, zwei und drei Monolagen Quantentöpfe. Die Quantentopfstrukturen aus vier bzw. fünf Monolagen zeigten nur sehr schwache Lumineszenz.

In Abb. 8 wurde die Intensität der Photolumineszenzlinien als Funktion der ZnSe-Schichtdicke aufgetragen. Dabei zeigte sich ab einer Schichtdicke von drei Monolagen eine deutliche Abnahme der Lumineszenzintensität. Gleichzeitig eingetragen ist die Halbwertsbreite der exzitonischen Lumineszenz. Die geringste Halbwertsbreite und damit die höchste kristalline Qualität wurde für eine Quantentopfstruktur mit einer Monolage beobachtet. Die Ergebnisse der Quantentopfstrukturen liefern also das gleiche Bild wie an den Supergittern. Ab einer Schichtdicke von 3 Monolagen ist die kritische Schichtdicke überschritten und es werden an den Zwischenflächen dichte Versetzungsnetzwerke eingebaut, die einerseits die Photolumi-

neszenzintensität vermindern und andererseits die Halbwertsbreite der Lumineszenzlinien wesentlich erhöhen.

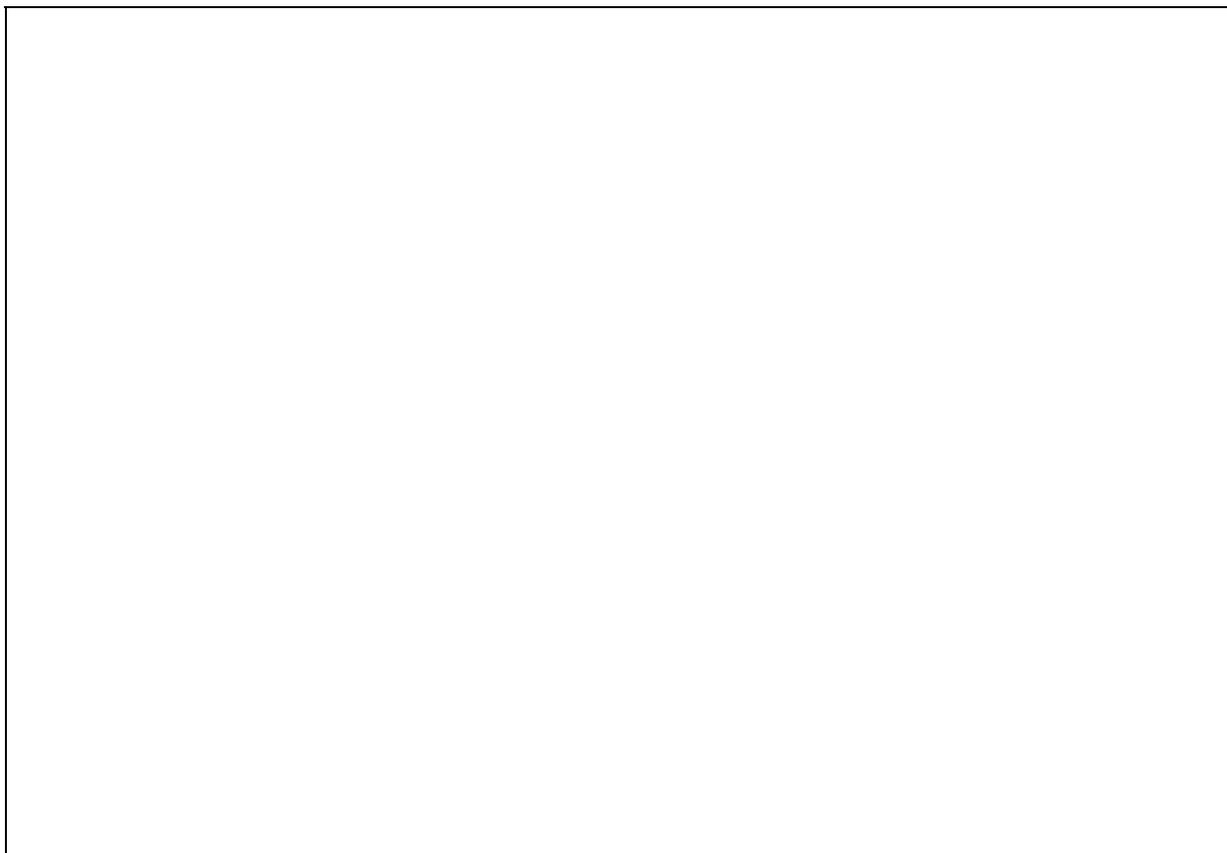


Abb. 8 Photolumineszenzintensität und Linienbreite als Funktion der CdSe-Quantentopfbreite.

Die ALE und die SME haben sich als äußerst wirksame Wachstumsmethoden für die Herstellung von II-VI Verbindungshalbleitern herausgestellt. Sowohl Supergitterstrukturen mit einer Feinheit von zwei Monolagen als auch Quantentopfstrukturen mit einer Dicke von nur einer einzelnen Monolage konnten erfolgreich hergestellt werden. Die hohe kristalline und optische Qualität der erzeugten Schichtstrukturen wurden mit Hilfe von Röntgen-Rocking-Kurven und Photolumineszenzuntersuchungen unter Beweis gestellt.

### Literaturverzeichnis

- [1] H. Sitter, W. Faschinger, Festkörperprobleme, *Avances in Solid State Physics*, Vol. 30, 219-237 (Vieweg, 1990).
- [2] W. Faschinger, P. Juza, S. Ferreira, H. Zajicek, A. Pesek, H. Sitter, K. Lischka, *Thin Solid Films*, in print.
- [3] F. Hauzenberger, W. Faschinger, P. Juza, A. Pesek, K. Lischka, H. Sitter, *Thin Solid Films*, in print.
- [4] W. Faschinger, F. Hauzenberger, P. Juza, H. Sitter, A. Pesek, H. Zajicek, K. Lischka, *Materials Science and Engineering*, in print.
- [5] W. Faschinger, P. Juza, S. Ferreira, H. Zajicek, A. Pesek, H. Sitter, K. Lischka, *Journal of Crystal Growth*, in print.

- 
- [6] P. Juza, H. Zajicek, H. Sitter, M. Helm, W. Faschinger, K. Lischka, *Appl. Phys. Lett.* 61, 3133 (1992).
- [7] H. Zajicek, P. Juza, E. Abamof, O. Pankratov, H. Sitter, M. Helm, G. Brunthaler, W. Faschinger, K. Lischka, *Appl. Phys. Lett.*, in print.