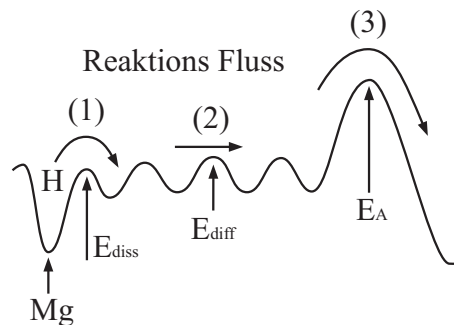


fernt (über die Oberfläche des Halbleiters oder in das Substrat) oder neutralisiert werden (z.B. an Kristalldefekten). Da die Diffusionsbarriere von  $H^+$  in Galliumnitrid im Bereich von 0.7 eV liegt und  $H^+$  somit sehr beweglich ist, kann es sehr einfach zur Kristalloberfläche oder zu Defekten gelangen. Die hohe Temperatur, die benötigt wird, um den Akzeptor zu aktivieren, spiegelt folglich eine Aktivierungsenergie wider, die zur Überwindung eines Oberflächenpotentials oder eines chemischen Bindungspotentials aufgewendet werden muss. Die Diffusion von Wasserstoff ins n-Gebiet einer Leuchtdiode ist unwahrscheinlich, da hier die notwendige Diffusionsenergie deutlich höher ist als im p-GaN [26].

Als Nachteil der Aktivierung bei hohen Temperaturen erweist sich die zusätzliche Ausdiffusion von Stickstoff. Dieser hinterlässt im Bereich der Oberfläche Stickstofffehlstellen, die als Donatoren mit einer Aktivierungsenergie von 30 meV unterhalb der Leitungsbandkante [37] eine effektive p-Dotierung im Bereich der Kontakte erschweren. Abhilfe kann hier eine Schutzschicht aus  $SiO_2$  [38] oder die Aktivierung in  $N_2$ -Überdruckatmosphäre [13] schaffen. Beide Methoden erlauben das Entweichen des Wasserstoffs aus dem Kristall, der Stickstoff wird jedoch an der Ausdiffusion gehindert.

Andere Modifikationen der thermischen Aktivierung zielen darauf ab, die benötigte Temperatur zum Erreichen der p-Leitfähigkeit zu senken. Geht man davon aus, dass der Wasserstoff über die Halbleiteroberfläche entfernt wird, muss vor allem das zu überwindende Oberflächenpotential gesenkt werden. Hierzu kann man entweder eine geeignete Deckschicht wie z.B. Nickel [39] verwenden, oder man ersetzt einen Teil [40, 41] oder die gesamte  $N_2$ -Atmosphäre durch Sauerstoff [42]. Problematisch bei letzterem Verfahren ist die unvermeidliche Bildung eines Oberflächenoxids, das anschliessend wieder entfernt werden



**Abbildung 2.4:** Schematische Darstellung der Aktivierungsreaktion des Mg-Akzeptors und der zugehörigen Energiebarrieren. Der bei niedrigerer Temperatur gebildete, neutrale Mg-H Komplex dissoziiert mit steigender Temperatur (1) und das gebildete  $H^+$  kann sich durch den Kristall bewegen (2). Ein weiterer Anstieg der Temperatur erlaubt dem Wasserstoff eine zusätzliche Barriere zu überwinden (3), die für das Entfernen aus dem p-Gebiet oder für die Neutralisation an Defekten steht [36].

## 2 Aktivieren der p-Dotierung

---

muss. Da die Oxidbildung jedoch verstärkt an Defekten erfolgt, ist eine nachhaltige Beeinträchtigung des Bauelements nicht ausgeschlossen. Andere Verfahren zielen darauf ab, den MgH-Komplex aufzubrechen und das entstandene  $H^+$  mittels Elektronen zu passivieren. Dadurch steht es nicht mehr als Reaktionspartner zur Passivierung des Magnesiums zur Verfügung. Die Elektronen werden während des Annealens entweder über Kontakte zugeführt [43] oder durch UV-Bestrahlung im Galliumnitrid erzeugt [44]. Beide Verfahren sind jedoch produktionstechnisch irrelevant, da einerseits die grossflächige Strominjektion in einem Annealofen prozesstechnisch schwierig ist, andererseits bei der Verwendung von UV-Licht aufgrund von Materialabsorption im GaN nicht davon ausgegangen werden kann, dass das gesamte p-Gebiet aktiviert wurde. Außerdem stellt sich bei beiden Verfahren die Frage, ob der passivierte Wasserstoff ausreichend stabil ist, um bei den bei Betrieb der Leuchtdioden herrschenden Temperaturen von 120 °C und mehr [45] nicht wieder ionisiert zu werden.

### 2.2 Alternative Akzeptoren

Neben Magnesium wurden noch weitere Elemente wie beispielsweise Beryllium (Be), Calcium (Ca), Zink (Zn) und Kohlenstoff (C) auf ihre Tauglichkeit als Akzeptoren in GaN untersucht. Auswahlkriterien waren dabei neben der Löslichkeit in GaN und der Tiefe der Störstelle (Ionisationsenergie) auch die Wahrscheinlichkeit einer Kompensation des Dotierstoffs durch andere Konfigurationen im Kristall (z.B. Einbau auf Zwischengitterplätze, Komplexbildung) und wie im Falle von MOVPE-Wachstum die Verfügbarkeit geeigneter Quellen (precursor). Mit Zn wurde aufgrund der Ionisierungsenergie von minimal 210 meV noch keine p-Leitfähigkeit erzeugt [46]. Es wurde jedoch Anfang der 70er zur Kompensation der Hintergrundladungsträgerkonzentration [47] und später zum Kodotieren von GaN- und InGaN-Schichten verwendet [1]. Es kommt zu einer Rot-Verschiebung der Peakwellenlänge, wodurch die gewünschte Emissionswellenlänge eingestellt werden konnte. Bisherige Untersuchungen von Be und C ergeben noch kein schlüssiges Bild [48, 49], da erste Erfolge durch weitere experimentelle Untersuchungen nicht bestätigt werden konnten. Ca mit einer Ionisierungsenergie von 169 meV ist mit Mg vergleichbar, die ersten Ergebnisse wurden jedoch an einer ionenimplantierten Probe erzielt [50], ein Einbau während des Wachstums wurde noch nicht untersucht.

## 2.3 Annealingexperimente

Ziel der Aktivierungsexperimente in dieser Arbeit ist es, eine möglichst große freie Löcherkonzentration bei den untersuchten p-Proben zu erzielen. Dabei soll versucht werden, die thermische Belastung für die Probe gering zu halten. Dies bedeutet, die notwendige Temperatur so klein und die Temperzeit so kurz wie möglich zu halten. Hintergrund für diese Rahmenbedingungen sind die im Vergleich zu GaN (ca. 1050 °C) geringen Wachstumstemperaturen von InGaN (ca. 750 °C), das in der aktiven Zone der LEDs verwendet wird. Um Veränderungen in den Quantenwells zu verhindern (Desorption von In an den Mesaflanken, In-Separation und -Klusterbildung) [51], sollte deshalb die thermische Belastung während des Annealingschritts möglichst klein sein.

### 2.3.1 Versuchsdurchführung

Die hier untersuchten Proben werden mittels MOVPE gewachsen und bestehen aus Mg-dotiertem Galliumnitrid auf einem nominell undotierten Puffer. Die Proben werden in ca. 5 x 5 mm<sup>2</sup> große Stücke geteilt und in einem schnellen Ausheizofen (rapid thermal annealer, RTA) aktiviert. Die Temperatur wurde zwischen 600 °C und 1000 °C variiert, die Annealzeit zwischen 30 s und 20 min. Alle Proben wurden in einer Stickstoffatmosphäre aktiviert, aufgrund des verwendeten Graphittellers im RTA können keine Versuche mit Sauerstoff bei Temperaturen von mehr als 500 °C durchgeführt werden. Nach der Aktivierung werden die Proben mit In-Kontakten versehen, die bei 350 °C für 10 s einlegiert werden. Anschließend werden die Proben nach dem im nächsten Kapitel beschriebenen Hall-Verfahren an einer Van-der-Pauw Struktur charakterisiert. Um zu gewährleisten, dass die In-Kontakte sperrfrei sind, werden sie jeweils vor der eigentlichen Hall-Messung hinsichtlich ihrer Kennlinien-Charakteristik untersucht.

### 2.3.2 Hall-Messungen

Die Leitfähigkeit

$$\sigma_{HL} = e(\mu_n n + \mu_p p) \quad (2.4)$$

eines Halbleiters wird als Produkt der Konzentration der Ladungsträger  $n$  und  $p$  und ihren Beweglichkeiten  $\mu_n$  und  $\mu_p$  bestimmt, wobei der Anteil der Minoritäten zumeist vernachlässigt werden kann. Für einige Anwendungen, wie beispielsweise die genaue Analyse von Kontakten, ist es notwendig, die Leitfähigkeit in Ladungsträgerkonzentration und Beweglichkeit aufzutrennen. Mit Hilfe des 1879 entdeckten Hall-Effekts lassen sich diese Größen