

# Bildung von GaN-Schichten auf Saphir durch Nieder-temperatur-Pufferschichten und Erzeugung von p-GaN durch Magnesium-Dotierung und Elektronenbeschuss (Nobel-Aufsatz)\*\*

Hiroshi Amano\*

Blaue LEDs · Elektronenbeschuss · Galliumnitrid · Halbleiter · Leuchtdioden

*Dieser Aufsatz ist eine persönliche Schilderung der Forschungsarbeiten, die zur Entwicklung einer Methode zur Kristallzüchtung von Galliumnitrid (GaN) auf einem Saphir-Substrat führten. Die Ergebnisse bereiteten den Weg für die Entwicklung von smarten Anzeigesystemen auf der Basis blauer LEDs. Die wichtigsten Arbeiten wurden Mitte bis Ende der 80er Jahre durchgeführt. Die Hintergründe der Arbeiten des Autors und die Ereignisse, die in der Technologie für die GaN-Züchtung und die Erzeugung von p-GaN resultierten, werden zusammengefasst.*

## 1. Motivation zur Erforschung blauer LEDs

Blaue Leuchtdioden (LEDs) spielen eine wichtige Rolle in unserem täglichen Leben. Sie sind in tragbaren Spielkonsolen und Smartphones verbaut, die vor allem für junge Menschen mittlerweile zum Alltag gehören. Die weltweit erste tragbare Spielkonsole wurde 1979 vorgestellt,<sup>[1]</sup> und Mobiltelefone sind seit 1984 im Handel.<sup>[2]</sup> Bis Ende der 90er Jahre jedoch waren die Displays schwarzweiß. Dass die junge Generation von heute diese Geräte in voller Farbe genießen kann, ist der Erfindung der blauen LED zu verdanken. Abgesehen von der Verwendung in Displays sind mittlerweile eine Reihe weiterer Anwendungen hinzugekommen. So können blaue LEDs in Verbindung mit Leuchtstoffen z. B. als weiße Lichtquellen dienen.<sup>[3]</sup>

In dieser Einleitung möchte ich kurz erklären, warum ich mich damals für die Entwicklung von blauen LEDs zu interessieren begann. Die beiden Computer-Giganten Microsoft und Apple wurden 1975 von Bill Gates und Paul Allen<sup>[4]</sup> bzw. 1976 von Steve Jobs und Stephen Wozniak<sup>[5]</sup> gegründet. Der Markt für Computer, insbesondere PCs, ist seither gewaltig expandiert.<sup>[6]</sup> In den ersten Computermonitoren waren, ebenso wie in Fernsehgeräten, Kathodenstrahlröhren (Braunsche Röhren) verbaut, die für Laptops viel zu groß waren. Die Röhrenfernseher jener Zeit waren unförmig und vor allem für die kleinen japanischen Wohnungen äußerst unkomfortabel. Als nun Professor Akasaki an der Nagoya University 1982 Nitrid-basierte blaue LEDs als Thema einer Bachelorarbeit ausschrieb, war ich sogleich hellauf begeistert.

Der Grund, weshalb ich in dieser Arbeitsgruppe forschen wollte, war, dass ich als naiver Student glaubte, die Physik der Nitrid-basierten blauen LEDs sei leicht zu verstehen. Ich glaubte, blaue LEDs erfinden zu können und damit zur besseren Lebensqualität der Menschen beizutragen – durch Fernseher mit flachem Bildschirm und smarten PC-Systemen. Das bedeutete, ich würde die Welt verändern! Natürlich war mir damals nicht klar, wie schwierig dieses Thema war.

## 2. Hürden bei der Entwicklung blauer GaN-LEDs

Wenn wir versuchen, makroskopische GaN-Kristalle aus einer Lösung zu züchten, benötigen wir sehr hohe Drücke und Temperaturen, ähnlich oder sogar höher als für die Herstellung von Diamant.<sup>[7,8]</sup> Also müssen wir eine chemische Reaktion benutzen, um den für die Züchtung von GaN benötigten Druck und die Temperatur zu reduzieren. Auch müssen wir Fremdsubstrate verwenden. Für die Synthese von GaN setzten wir Ammoniak als Stickstoffquelle ein,<sup>[9]</sup> weil Stick-

[\*] Prof. H. Amano  
Department of Electrical Engineering and Computer Science  
Venture Business Laboratory, Akasaki Research Center  
Nagoya University (Japan)  
E-Mail: amano@ccrns.meijo-u.ac.jp

[\*\*] Copyright© Nobelstiftung 2014. Wir danken der Nobelstiftung, Stockholm, für die Genehmigung zum Abdruck einer deutschen Fassung dieses Vortrages.

stoffmoleküle inert sind und nicht aktiv mit metallischem Ga reagieren. Ammoniak ist sehr aktiv bei den für die Synthese von GaN benötigten Temperaturen von ungefähr 1000 °C. Das bedeutete, dass die Reihe an in Frage kommenden Substraten begrenzt war.

Saphir war eines der vielversprechendsten Substratmaterialien, weil es bei hohen Temperaturen stabil ist und nicht so stark mit Ammoniak reagiert.<sup>[10]</sup> Das große Problem mit Saphir war jedoch die erhebliche Gitterfehlpassung mit GaN von bis zu 16 % pro (0001)-Ebene. Die allgemeine Auffassung war, dass für ein heteroepitaxiales Wachstum die Gitterfehlpassung nicht mehr als ein paar Prozent betragen dürfe,<sup>[11]</sup>



Hiroshi Amano wurde am 11. September 1960 in Hamamatsu in der Präfektur Shizuoka geboren. Hamamatsu ist bekannt als Geburtsort von Professor Kenjiro Takayanagi, einem Pionier der Entwicklung von Fernsehgeräten, und auch von Soichiro Honda, dem Gründer der Honda Motor Co., Ltd. Zudem sind etliche Ingenieur- und Industriebetriebe in Hamamatsu beheimatet, darunter Motorradhersteller, Hersteller von Musikinstrumenten und optoelektronische Firmen. Dieses industriell geprägte Umfeld könnte gut dazu beigetragen haben, dass Amano

eine Laufbahn als Ingenieur einschlug.

Er absolvierte die High School in Hamamatsu und zog 1979 nach Nagoya, um an der Nagoya University am Department of Electrical Engineering zu studieren. 1982 schloss er sich der Gruppe von Professor Isamu Akasaki an und begann im Rahmen seiner Dissertation mit Forschungen an Nitrid-basierten blauen LEDs. Hinzu kamen Forschungen über Halbleiter aus Gruppe-III-Nitriden und deren Anwendungen. 1983, 1985 und 1989 erhielt er den Bachelor of Engineering, den Master of Engineering und den Doctor of Engineering an der Nagoya University.

1985 erfand er die Niedertemperatur-Pufferschichttechnologie, welche die Herstellung von qualitativ hochwertigen Gruppe-III-Halbleiter-LEDs und Laserdioden ermöglichte. 1988, nach erfolgreicher Promotion, wurde er Research Associate an der School of Engineering in Nagoya. 1989 gelang ihm zusammen mit seinen Kollegen zum ersten Mal in der Welt die Kristallzüchtung von p-GaN und die Herstellung einer p-n-LED.

1992 wechselte er an die School of Science and Technology der Meijo University, wo er Assistant Professor in der Gruppe von Professor Akasaki wurde. 1998 und 2002 wurde er Associate Professor und Professor. 2010 wechselte er auf eine Professur an das Engineering Department der Nagoya University. Ab 2011 war er Direktor des Akasaki Research Center der Nagoya University.

Für seine Arbeiten erhielt er eine Reihe von Auszeichnungen: IEEE/LEOS Engineering Achievement Award, IEEE (1996), Rank Prize, Rank Prize Foundation, UK (1998), Marubun Academic Award, Marubun Research Promotion Foundation, Japan (2002), Takeda Award, Takeda Foundation, Japan (2002), Japanese Association for Crystal Growth Award, JACG, Japan (2008), NISTEP Award, National Institute of Science and Technology Policy, Japan (2009), Order of Culture from the Japanese Emperor (2014), Nobelpreis für Physik Nobel Foundation, Sweden (2014). Er ist Fellow der Japan Society of Applied Physics, JSAP, Japan (seit 2009) und des IOP, Institute of Physics, UK (seit 2011).

Er war/ist außerdem Mitglied mehrerer akademischer Organisationen, unter anderem als Sub Chair des Program Committee des International Symposium on Compound Semiconductors in 2007, Program Committee Chair des Second International Symposium on Growth of Nitride Semiconductors in 2010, Program Committee Chair des 3rd International Symposium on Growth of Nitride Semiconductors in 2012 und Organizing Committee Chair des International Workshop on Nitride Semiconductors in 2012.

eine Fehlpassung von 16 % sollte das Unterfangen daher fast unmöglich machen.

1971 entwickelte Professor Pankove die ersten GaN-basierten blauen LEDs. Es war ein Metall-Isolator-Halbleiter-(MIS)-System, das durch Hydrid dampfphasenepitaxie (HVPE) hergestellt wurde, welche auf der chemischen Reaktion von Ga und Chlorwasserstoff zur Bildung von GaCl und Ammoniak basierte.<sup>[12]</sup> Damals glaubte man, dass es wegen des Effekts der Selbstkompensation unmöglich sei, p-GaN zu züchten.<sup>[13]</sup> Selbstkompensation bedeutet, wenn wir Akzeptoren als Verunreinigung eindotieren, die gleiche Zahl an intrinsischen Donoren wie z.B. Stickstoff-Fehlstellen erzeugt wird, um die eindotierten Akzeptoren zu kompensieren.

Ein anderer Grund, weshalb blaue LEDs so schwierig herzustellen sind, hängt mit der Empfindlichkeit des menschlichen Auges ab. Die Ansprechempfindlichkeit des menschlichen Auges auf reines blaues Licht beträgt nur 3 % von gelb-grünem Licht von 555 nm Wellenlänge.<sup>[14]</sup>

### 3. Forschungsförderung an japanischen Universitäten Mitte der 80er Jahre und Hürden bei der GaN-Züchtung auf einem Saphirsubstrat

Lassen Sie mich in die frühen 80er Jahre zurückgehen. Professor Akasaki begann seine Forschungen an Nitriden 1967<sup>[15]</sup> am Matsushita Research Institute Tokyo (MRIT), mittlerweile Panasonic, mit Studien an pulverförmigem AlN. Danach begann seine Gruppe mit der Kristallzüchtung von GaN mittels Molekularstrahlepitaxie (MBE) und beobachtete die Kathodolumineszenz dieser Materialien. Es folgten Experimente mit HVPE, und Ende der 70er Jahre gelang damit die Herstellung von blauen LEDs vom MIS-Typ mit Flip-Chip-Konfiguration.<sup>[16]</sup> Leider entschloss sich das MRIT, die Forschung an GaN-basierten blauen LEDs aufzugeben, und Professor Akasaki wechselte 1981 vom MRIT an die Nagoya University. Ich trat seiner Arbeitsgruppe 1982 als Bachelorstudent bei.

Das Problem bei der Herstellung von blauen LEDs vom MIS-Typ mittels HVPE bestand darin, dass die Wachstumsgeschwindigkeit so hoch war, dass die Dicke der Isolatorschicht in der MIS-Struktur kaum kontrolliert werden konnte. Entsprechend ließ sich die Betriebsspannung nicht kontrollieren. Ein weiteres Problem, das Professor Akasaki bemerkte, war die schwierige Bildung von GaN mittels MBE. Er entschloss sich daher, die metallorganische Dampfphasenepitaxie (MOVPE) für die Bildung von GaN auszuprobieren. Die Forschungsförderung an japanischen Universitäten war damals unzureichend.<sup>[17]</sup> Auch gab es kein kommerziell erhältliches MOVPE-System, das speziell auf die Züchtung von GaN zugeschnitten war. Es war folglich nicht möglich, ein kommerzielles MOVPE-System zu kaufen. Also entwickelte 1982 ein Masterstudent, zwei Jahre älter als ich, den ersten vertikalen MOVPE-Reaktor.<sup>[18]</sup> Die Strömungsgeschwindigkeit war so niedrig, dass wir GaN nicht mit Wasserstoff als Trägergas herstellen konnten. Ich versuchte, über die Reaktion zwischen TiCl<sub>4</sub> und H<sub>2</sub>O und der Bildung von TiO<sub>2</sub>-Pulver das Strömungsmuster zu visualisieren und fand, dass

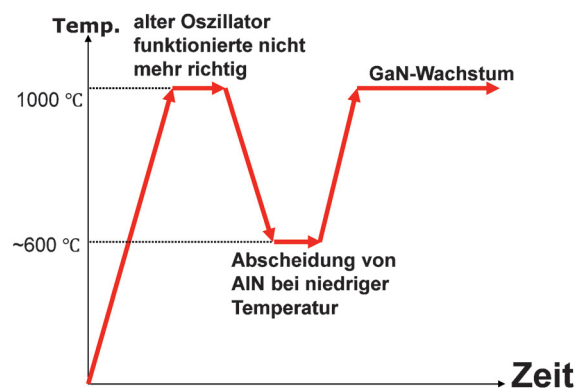
die Strömungsgeschwindigkeit nicht ausreicht, wenn ich Wasserstoff als Trägergas verwenden würde.

1984 begann Y. Koide seine Doktorarbeit bei Professor Akasaki und forschte über AlGaIn und AlN, während ich mich mit der Züchtung von GaN beschäftigte. Ich wusste aus Erfahrung, dass mit den alten Anordnungen der Gasversorgungsschläuche im Reaktor keine ausreichende Strömungsgeschwindigkeit erreicht werden konnte und verband daher sämtliche Gasleitungen zu einer einzigen Leitung, wodurch ich die Strömungsgeschwindigkeit von einigen  $\text{cm s}^{-1}$  auf mehr als  $4 \text{ m s}^{-1}$  steigern konnte.<sup>[19]</sup> Danach gelang mir die erfolgreiche Züchtung von GaN auf einem Saphirsubstrat, sogar mit Wasserstoff als Trägergas. Allerdings war die Oberfläche des Materials recht rau, und die Qualität war sehr schlecht.

Ich versuchte GaN viele Male herzustellen, indem ich die Temperatur, die Strömungsgeschwindigkeit der Reagens- und Trägergase, die Anordnung der Gasleitungen, die Form des Suszeptors und andere Parameter veränderte. Es gelang mir jedoch nicht, qualitativ hochwertiges GaN mit einer glatten Oberfläche zu züchten. Das Problem der großen Gitterfehlpassung von 16 % war zu schwierig, um von einem Masterstudenten überwunden zu werden. So vergingen fast zwei Jahre ohne Erfolg.

#### 4. Niedertemperatur-Pufferschicht

Im Februar 1985 war ich fast am Ende meines Masterstudiums. Ein ausländischer Student und ich hatten geplant, ab April mit der Promotion anzufangen. Während all die anderen japanischen Studenten auf Abschlussfahrt gingen, führte ich einsame Experimente durch. Dr. Koide befasste sich damals mit der Züchtung von Al-haltigen Nitriden wie AlN und AlGaIn, ich mit GaN. Wir verglichen seine Al-haltigen Kristalle und mein GaN, und es schien, dass die Oberfläche seiner Kristalle glatter war. Mir kam der Gedanke, AlN zu benutzen, um GaN mit einer besseren Oberflächenmorphologie herzustellen. Also versuchte ich, eine dünne AlN-Schicht auf einem Saphirsubstrat abzuscheiden, um anschließend mein GaN darauf zu züchten. Ich wusste, dass die Temperatur für das epitaxiale Wachstum von AlN über  $1200^\circ\text{C}$  liegen sollte. Da der alte Oszillator aber nicht gut funktionierte, schaffte ich es nicht, die Temperatur auf  $1200^\circ\text{C}$  zu bringen. Da fiel mir plötzlich eine Diskussion im Laboratorium ein. Dr. Sawaki, damals Associate Professor, erläuterte den Wachstumsprozess von Borphosphid (BP) auf Si,<sup>[20]</sup> die ebenfalls eine große Gitterfehlpassung von 16 % aufweisen. Er erklärte, dass eine Vorströmung von Phosphor als Quellgas unmittelbar vor der BP-Bildung ein effektives Kristallwachstum ermöglicht, und meinte, dass die Phosphor-Atome offenbar als Keimbildungszentren wirken. Ich überlegte mir also, durch Abscheidung einer kleinen Menge von AlN bei niedriger Temperatur Keimbildungszentren generieren zu können. Die Temperatursequenz des Wachstumsprozesses ist in Abbildung 1 gezeigt. Normalerweise schaute ich während des Wachstumsprozesses in den Reaktor, um zu sehen, ob es ein Interferenzmuster auf dem Substrat gab. Auf diese Weise konnte ich überprüfen, ob das Quellgas richtig

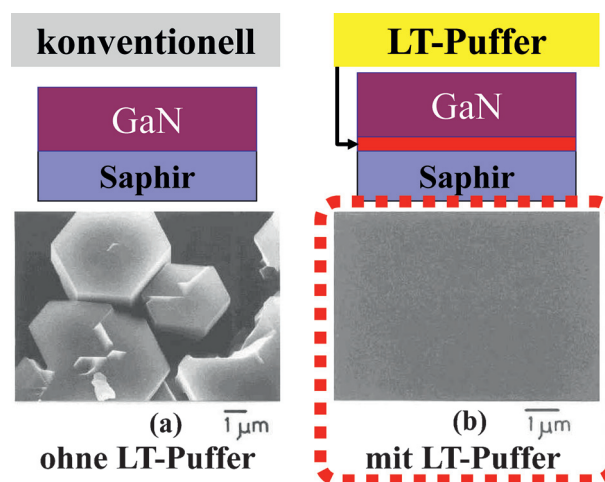


**Abbildung 1.** Temperatursequenz des Suszeptors beim Wachstum von GaN auf einem Saphirsubstrat mithilfe einer Niedertemperatur-Pufferschicht aus AlN.

eingetragen wurde. Dieses Mal jedoch war ich müde und vergaß, das Interferenzmuster zu prüfen. Als ich die Probe aus dem Reaktor nahm und sah, dass sie eine perfekt glatte Oberfläche hatte und perfekt transparent war, dachte ich „Oh, ich habe einen Fehler gemacht! Ich habe das Trimethylgallium vergessen!“

Bei nochmaligem Überlegen begriff ich aber, dass ich keinen Fehler gemacht hatte.

Ich überprüfte die Oberfläche mit einem Nomarski-Mikroskop und fand, dass mir die erfolgreiche Herstellung von atomar flachem GaN gelungen war, wie in Abbildung 2 gezeigt. Dem Vorschlag von Professor Akasaki folgend, unter-



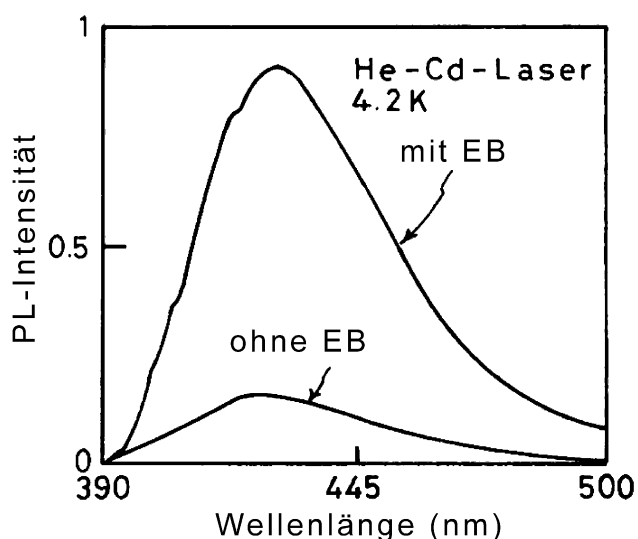
**Abbildung 2.** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von GaN auf einem (0001)-Saphirsubstrat a) ohne und b) mit einer Niedertemperatur-Pufferschicht aus AlN.<sup>[19]</sup>

suchte ich die kristallinen, optischen und elektrischen Eigenschaften, die alle deutlich besser waren als in früheren Berichten beschrieben. Der Prozess ist als Niedertemperatur-Pufferschichtmethode bekannt und wurde von vielen Forschern weltweit angewendet.<sup>[21–37]</sup>



## 5. Erzeugung von p-GaN

Unsere nächste Aufgabe war die Erzeugung von p-GaN. Ich stellte viele Male Zn-dotiertes GaN her, aber alle Proben waren stark resistiv oder vom n-Typ. 1987, während meiner Doktorarbeit, beobachtete ich eine sehr scharfe Excitonenemission aus Zn-dotiertem GaN entlang der *c*- und *a*-Achsen des Saphirsubstrats.<sup>[22]</sup> Ich nahm außerdem Messungen des Deformationspotentials von GaN vor. Die Ergebnisse waren begeisternd, und ich wollte sie auf dem Herbst-Tagung der Japan Society for Applied Physics vorstellen, die an der Nagoya University abgehalten wurde. Allerdings war ich überrascht zu sehen, dass bei meinem Vortrag nur vier Personen im Hörsaal waren: der Vorsitzende, Prof. Akasaki, noch jemand und ich. Die Forschung war damals an anderen Halbleitern wie GaAs und ZnSe interessiert, GaN-Forscher waren in der Minderheit. Ebenfalls 1988 fand ich, dass die Zn-basierte blaue Emission in Kathodolumineszenzmessungen irreversibel verstärkt wurde, wie in Abbildung 3 gezeigt.<sup>[38]</sup> Ich nannte diesen Prozess niederenergetischen Elektronenbeschuss (LEEBI, low-energy electron beam irradiation). Aber selbst nach LEEBI zeigte Zn-dotiertes GaN keine p-Leitfähigkeit.



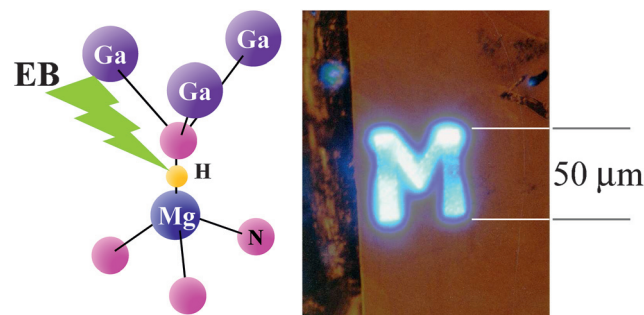
**Abbildung 3.** Änderung der blauen Photolumineszenzintensität bei Elektronenbeschuss (EB) von Zn-dotiertem GaN.<sup>[38]</sup>

1989 wurde ich wissenschaftlicher Mitarbeiter am Akasaki-Laboratorium an der Nagoya University. Ich las Phillips' Lehrbuch *Bonds and Bands in Semiconductors*<sup>[39]</sup> und fand ein Diagramm besonders interessant. Es zeigt, dass Mg besser geeignet ist für die Aktivierung von Akzeptoren als Zn. Allerdings war die Mg-Quelle,  $\text{Cp}_2\text{Mg}$ , zu teuer. Ich bettelte Professor Akasaki also an, mich etwas davon kaufen zu lassen. Er gab mir freundlicherweise die Erlaubnis, und nachdem ich mehrere Monate auf die Lieferung gewartet hatte, war ich in der Lage, zusammen mit meinem damaligen

Laborpartner und Masterstudenten Mr. Kito, viele Mg-dotierte Proben herzustellen.

An dieser Stelle möchte ich die Pionierarbeiten von Dr. Maruska aus dem Jahr 1972 erwähnen,<sup>[40]</sup> der damals Student an der Stanford University war. Ihm gelang die Herstellung der weltweit ersten violetten LED vom MIS-Typ mittels Mg-dotiertem GaN.

Alle unsere Mg-dotierten GaN-Proben waren zunächst hoch resistiv. Nach LEEBI zeigten jedoch einige Proben p-Halbleiterverhalten in Hot-Probe-Messungen. Ich wusste, dass heiße Sonden nicht sehr verlässlich sind und dass niemand glauben würde, dass ich den p-Halbleiter erzeugt hätte. Infolgedessen nahm Mr. Kito Messungen des Hall-Effekts an den Proben vor, und wir erkannten schließlich, dass wir zum ersten Mal auf der Welt p-GaN hergestellt hatten. Wir stellten auch ultraviolette p-n-LEDs her, wie in Abbildung 4 gezeigt.<sup>[41–44]</sup> Bald darauf verwendete auch Dr. Nakamuras Arbeitsgruppe die LEEBI-Technik.<sup>[45,46]</sup> 1992 berichtete Dr. Nakamura, dass p-GaN durch einfache thermische Behandlung erhalten werden konnte.<sup>[47]</sup> Heute benutzen fast alle LED-Hersteller thermische Verfahren.



**Abbildung 4.** Prinzip der Aktivierung von wasserstoffpassiviertem Mg in GaN<sup>[48]</sup> und Elektrolumineszenzmuster einer GaN-LED; nur der Bereich mit dem Buchstaben „M“ wurde mit dem Elektronenstrahl beschossen.<sup>[41]</sup>

Der Mechanismus der p-Leitung basiert auf der Desorption von Wasserstoff in der Nähe von Mg-Akzeptoren (siehe Abbildung 4), wie erstmals von Professor Van Vechten beschrieben<sup>[48]</sup> und von Dr. Nakamura experimentell bestätigt wurde.<sup>[47]</sup>

## 6. Versuche zur Züchtung von InGaN

Eine andere wichtige Aufgabe für uns war die Realisierung einer echten blauen Emission durch Band-zu-Band-Übergang. Wir versuchten uns also an der Kristallzüchtung von InGaN. Auch dieses Unterfangen war jedoch sehr schwierig, und es gelang uns lediglich, InGaN mit einem In-Gehalt unter 1,7 % herzustellen.<sup>[49]</sup>

1989 berichtete Dr. Matsuokas Gruppe am NTT über die erfolgreiche Züchtung von InGaN unter extrem hoher Ammoniakzufuhr mit Stickstoff als Trägergas.<sup>[50]</sup> Sie vermeldeten eine blau-violette Photolumineszenz (PL) bei 77 K, ein Anzeichen für den Einbau von In. Bei Raumtemperatur konnte

eine von tiefen Energieniveaus stammende, gelbe Emission beobachtet werden. Der Mechanismus des Indium-Einbaus in InGaN wurde von Professor Koukitu et al. mittels thermodynamischer Analysen aufgeklärt.<sup>[52,53]</sup>

Mithilfe der Techniken für die Züchtung qualitativ hochwertiger Kristalle mit der Niedertemperatur-Pufferschichtmethode in Kombination mit Methoden für die Züchtung von p-GaN und InGaN gelang schließlich der Nichia Corporation 1993 die weltweit erste Kommerzialisierung von blauen LEDs vom Doppelheterostrukturtyp.<sup>[54]</sup> 1995 folgten die Quantentopf-LEDs,<sup>[55]</sup> die ebenfalls eine sehr wichtige Technologie zur Effizienzsteigerung von Nitrid-LEDs darstellten, da ein sehr schmaler Quantentopf den Stark-Effekt unterdrückt<sup>[56]</sup> und auf diese Weise die Übergangswahrscheinlichkeit erhöht.<sup>[57]</sup>

## 7. Beitrag der InGaN-basierten blauen LEDs zur Energieeinsparung

Lassen Sie mich zum Schluss erklären, wie InGaN-LEDs zur Verbesserung des Stromhaushalts beitragen können, insbesondere in Japan. Viele Menschen erinnern sich an das große Erdbeben 2011 im östlichen Japan und die Kernschmelze im Atomkraftwerk von Fukushima. Gegenwärtig ist keines der 48 japanischen Atomkraftwerke in Betrieb.<sup>[58]</sup> Vor 2011 wurde rund 30 % des Strombedarfs in Japan in Atomreaktoren erzeugt. Wir müssen also einen Weg finden, diesen Verlust von 30 % an Stromkapazität auszugleichen. Nach einer Prognose des US Department of Energy werden in den Vereinigten Staaten bis zum Jahr 2030 mehr als 70 % der Beleuchtungssysteme durch LEDs ersetzt werden, was zu einer Senkung des Gesamtenergieverbrauchs um 7 % führen wird.<sup>[59]</sup> Für Japan ist zu erwarten, dass LED-Lichtsysteme den Markt sehr viel schneller durchdringen werden. Ein japanisches Forschungsunternehmen hat geschätzt, dass im Jahr 2020 mehr als 70 % der allgemeinen Beleuchtung durch LEDs ersetzt sein wird.<sup>[60]</sup>

Wichtiger noch ist, dass wir kompakte Beleuchtungssysteme für die jüngere Generation entwickeln und bereitstellen können, z.B. für Kinder in entlegenen Gegenden ohne Zugang zu Elektrizität. Abbildung 5 zeigt ein Bild von der Erde bei Nacht.<sup>[61]</sup> Mithilfe eines LED-Lichtsystems mit

einem Solarzellenfeld und einer Batterie können Kinder in der Nacht Bücher lesen und lernen, wie im Einschub in Abbildung 5 gezeigt ist.

Ich möchte zum Schluss ein Wort an die jungen Forscher richten. Als wir den LT-Puffer herstellten, war ich ein 24-jähriger Masterstudent, und als wir das erste Mal p-GaN in Händen hielten war ich 28 Jahre alt. Natürlich hatte ich sehr großes Glück, meine Forschungen unter der exzellenten Führung von Prof. Akasaki und vielen hervorragenden Kollegen durchführen zu können. Heute sind die Institute und deren Finanzausstattung deutlich besser gestellt als in den 80er Jahren. Ich würde deshalb gerne Zeuge werden, wie die junge Generation Projekte angeht, die zur Verbesserung der Lebensqualität der Menschen beitragen. Indem sie dies tut, kann die jüngere Generation eine viel bessere Welt für sich erschaffen.

## Danksagung

*Ich möchte den folgenden Menschen danken: Isamu Akasaki, Nobuhiko Sawaki, Kazumasa Hiramatsu, Shigeru Tamura, Atsushi Shimizu, Yasuo Koide, Kenji Itoh, Takahiro Kozawa, Masahiro Kito, Kouichi Naniwae; den ehemaligen Studenten des Akasaki-Laboratoriums an der Nagoya University, Satoshi Kamiyama, Tetsuya Takeuchi und Motoaki Iwaya; den ehemaligen Studenten der Akasaki- und Amano-Laboratorien an der Meijo University, Masahito Yamaguchi, Yoshio Honda, Guangju Ju, Kaddour Lekhal und Siyoung Bae; den Studenten der Amano-, Yamaguchi- und Honda-Laboratorien an der Nagoya University, Aki Eguchi, Masako Yasui, Yoko Tatsumi, Tomoko Hosoe, Michinari Hamaguchi, Hideyo Kunieda, Yoshihito Watanabe, Yasuo Suzuoki und Seiichi Matsuo; den Mitarbeitern an der Nagoya University, Koichi Ota, Naoki Shibata, Nobuo Okazaki, Katsuhide Manabe, Michinari Sassa, Hisaki Kato, Masahiro Kotaki und Tadashi Arashima; den Mitarbeitern bei Toyoda Gosei, Masafumi Hashimoto, Akira Hirano, Masamichi Ipponmatsu, Cyril Pernot, Hide-masa Tomosawa und Toshihiko Kai; und den Mitarbeitern bei UVCR und Nikkiso. Ganz besonders danke ich meinen Eltern Yoshiko und Tatsuji Amano, meinem Bruder Takashi Amano und meiner Familie, Kasumi, Aya und Mitsuru Amano.*

**Zitierweise:** *Angew. Chem. Int. Ed.* **2015**, 54, 7764–7769  
*Angew. Chem.* **2015**, 127, 7874–7879



Abbildung 5. Aufnahme von der Erde bei Nacht (NASA).<sup>[61]</sup>

- [1] [http://gaming.wikia.com/wiki/History\\_of\\_handheld\\_game\\_consoles](http://gaming.wikia.com/wiki/History_of_handheld_game_consoles).
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Mobile\\_phone](http://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_phone).
- [3] P. Schlotter, R. Schmidt, J. Schneider, *Appl. Phys. A* **1997**, 64, 417.
- [4] <http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/5085630.stm>.
- [5] <http://www.notablebiographies.com/Ho-Jo/Jobs-Steve.html>.
- [6] <http://www.maximizingprogress.org/2012/03/platform-wars-history-of-emergent.html>.
- [7] S. Porowski, I. Grzegory, *J. Cryst. Growth* **1997**, 178, 174.
- [8] F. P. Bundy, H. T. Hall, H. M. Strong, R. H. Wentorf, *Nature* **1955**, 176, 51.
- [9] W. C. Johnson, J. B. Parsons, M. C. Crew, *J. Phys. Chem.* **1932**, 36, 7.
- [10] H. P. Maruska, J. J. Tietjen, *Appl. Phys. Lett.* **1969**, 15, 327.

- [11] Zum Beispiel: F. C. Frank, J. H. van der Merwe, *Proc. R. Soc. London Ser. A* **1949**, 198, 205.
- [12] J. I. Pankove, E. A. Miller, D. Richman, J. E. Berkeyheiser, *J. Lumin.* **1971**, 4, 63.
- [13] Zum Beispiel: G. Mandel, *Phys. Rev. A* **1964**, 134, A1073.
- [14] Zum Beispiel photopisches V( $\lambda$ ), modifiziert durch Vos (1978) <http://www.cvr1.org/>, Copyright 1995–2015 Color and Vision Research Labs.
- [15] I. Akasaki, M. Hashimoto, *Solid State Commun.* **1967**, 5, 851.
- [16] Y. Ohki, Y. Toyoda, H. Kobayashi, I. Akasaki, *Inst. Phys. Conf. Ser.* **1982**, 63, 479.
- [17] Zum Beispiel: <http://www.mext.go.jp/english/whitepaper/1302651.htm>.
- [18] M. Hashimoto, H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, *J. Cryst. Growth* **1984**, 68, 163.
- [19] H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, Y. Toyoda, *Appl. Phys. Lett.* **1986**, 48, 353.
- [20] T. Nishinaga, T. Mizutani, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1975**, 14, 753.
- [21] H. Amano, I. Akasaki, K. Hiramatsu, N. Koide, N. Sawaki, *Thin Solid Films* **1988**, 163, 415.
- [22] H. Amano, K. Hiramatsu, I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1988**, 27, L1384.
- [23] I. Akasaki, H. Amano, Y. Koide, K. Hiramatsu, N. Sawaki, *J. Cryst. Growth* **1989**, 98, 209.
- [24] H. Amano, T. Asahi, I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1990**, 29, L205.
- [25] K. Hiramatsu, H. Amano, I. Akasaki, H. Kato, N. Koide, K. Manabe, *J. Cryst. Growth* **1991**, 107, 509.
- [26] K. Hiramatsu, S. Itoh, H. Amano, I. Akasaki, N. Kuwano, T. Shiraishi, K. Oki, *J. Cryst. Growth* **1991**, 115, 628.
- [27] N. Kuwano, T. Shiraishi, A. Koga, K. Oki, K. Hiramatsu, H. Amano, K. Itoh, I. Akasaki, *J. Cryst. Growth* **1991**, 115, 381.
- [28] S. Nakamura, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1991**, 30, 1620.
- [29] H. Murakami, T. Asahi, H. Amano, K. Hiramatsu, N. Sawaki, I. Akasaki, *J. Cryst. Growth* **1991**, 115, 648.
- [30] J. N. Kuznia, M. A. Khan, D. T. Olson, R. Kaplan, J. Freitas, *J. Appl. Phys.* **1993**, 73, 4700.
- [31] S. T. Kim, H. Amano, I. Akasaki, N. Koide, *Appl. Phys. Lett.* **1994**, 64, 1535.
- [32] T. Sasaki, T. Matsuoka, *J. Appl. Phys.* **1995**, 77, 192.
- [33] Y. M. Le Vaillant, R. Bisaro, J. Oliver, O. Durand, J. Y. Duboz, S. Ruffenach-Clur, O. Briot, B. Gil, R. L. Aulombard, *Mater. Sci. Eng. B* **1997**, 50, 32.
- [34] M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Yamaguchi, C. Wetzel, H. Amano, I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1998**, 37, L316.
- [35] Y. M. Le Vaillant, R. Bisaro, J. Olivier, O. Durand, J.-Y. Duboz, S. Ruffenach-Clur, O. Briot, B. Gil, R. L. Aulombard, *J. Cryst. Growth* **1998**, 189, 282.
- [36] Y. Kobayashi, T. Akasaki, N. Kobayashi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1998**, 37, L1208.
- [37] T. Ito, K. Phtsuka, K. Kuwahara, M. Sumiya, Y. Takano, S. Fuke, *J. Cryst. Growth* **1999**, 205, 20.
- [38] H. Amano, I. Akasaki, T. Kozawa, K. Hiramatsu, N. Sawaki, K. Ikeda, Y. Ishii, *J. Lumin.* **1988**, 40–41, 121.
- [39] J. C. Phillips, *Bonds and Bands in Semiconductors*, Academic Press, New York, **1973**.
- [40] H. P. Maruska, W. C. Rhines, D. A. Stevenson, *Mater. Res. Bull.* **1972**, 7, 777.
- [41] H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu, I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1989**, 28, L2112.
- [42] H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu, I. Akasaki, *J. Electrochem. Soc.* **1990**, 137, 1639.
- [43] I. Akasaki, H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu, *J. Lumin.* **1991**, 48 & 49, 666.
- [44] I. Akasaki, H. Amano, H. Murakami, M. Sassa, H. Kato, K. Manabe, *J. Cryst. Growth* **1993**, 128, 379.
- [45] S. Nakamura, M. Senoh, T. Mukai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1991**, 30, L1708.
- [46] S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh, T. Mukai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1992**, 31, 1258.
- [47] S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, N. Iwasa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1992**, 31, L139.
- [48] J. A. Van Vechten, J. D. Zook, R. D. Horning, B. Goldenberg, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1992**, 31, 3662.
- [49] T. Kozawa, Master's Thesis, Nagoya University, **1987**.
- [50] T. Matsuoka, H. Tanaka, T. Sasaki, A. Katsui, *Inst. Phys. Conf. Ser.* **1990**, 106, 141.
- [51] N. Yoshimoto, T. Matsuoka, T. Sasaki, A. Katsui, *Appl. Phys. Lett.* **1991**, 59, 2251.
- [52] A. Koukitu, N. Takahashi, T. Taki, H. Seki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1996**, 35, L673.
- [53] A. Koukitu, T. Taki, N. Takahashi, H. Seki, *J. Cryst. Growth* **1999**, 197, 99.
- [54] S. Nakamura, M. Senoh, T. Mukai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1993**, 32, L8.
- [55] S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, S. Nagahama, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1995**, 34, L797.
- [56] H. Amano, I. Akasaki, Ext. Abst. Int. Conf. Solid State Devices and Materials, V-7 **1995**, 683.
- [57] T. Takeuchi, S. Sota, M. Katsuragawa, M. Komori, H. Takeuchi, H. Amano, I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1997**, 36, L382.
- [58] [http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/nuclear/001/pdf/001\\_02\\_001.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf) (in Japanisch).
- [59] U.S. DOE Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications, Jan. 2012, (2012) 4. ([http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl\\_energy-savings-report\\_jan-2012.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_energy-savings-report_jan-2012.pdf)).
- [60] Fuji Chimera Research Institute, Inc., 2014 LED Related Market Survey, (2014) 41.
- [61] <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/NightLights/page3.php>.

Eingegangen am 19. Februar 2015

Online veröffentlicht am 1. Juni 2015

Übersetzt von Dr. Frank Maaß, Weinheim