

BELEUCHTUNG

Licht aus Kristallen

Die physikalischen Grundlagen anorganischer Leuchtdioden

Ansgar Laubsch, Matthias Sabathil, Berthold Hahn und Klaus Streubel

Seit über einhundert Jahren ist Elektrolumineszenz bekannt, also die Emission von „kaltem“ Licht aus einem Festkörper, durch den ein Strom fließt. Fast fünfzig Jahre dauerte es jedoch, bis die Entdeckung der III-V-Halbleiter wie Galliumarsenid erste kommerzielle Leuchtdioden (LEDs) ermöglichte. Und erst in den letzten Jahren haben hocheffiziente blaue LEDs den Weg bereitet für weiße Leuchtdioden, die aufgrund ihrer hohen Effizienz und Lebensdauer schon bald Glühlampen und andere Lichtquellen ablösen könnten.

Herkömmliche Glühlampen erreichen bei der Umwandlung von elektrischer Energie in sichtbares Licht nur einen Wirkungsgrad im einstelligen Prozentbereich. Im Gegensatz hierzu haben die besten derzeit verfügbaren Leuchtdioden einen Wirkungsgrad jenseits von 50 % [1, 2]. Neben der hohen Effizienz sind solche lichtemittierenden Dioden (Light Emitting Diodes, LEDs) mechanisch robust und zeichnen sich durch extrem lange Lebensdauern aus. Ihre kleinen Abmessungen eröffnen auch eine große Freiheit beim Design von Leuchtmitteln. Da die Effizienz von Leuchtdioden in den letzten Jahren stetig zugenommen hat und die relativen Kosten pro Lichtmenge gesunken sind, haben LEDs stark an kommerzieller Bedeutung gewonnen. Weiße Leuchtdioden als Lichtquelle in der Allgemeinbeleuchtung versprechen zudem große ökologische Vorteile (vgl. den Artikel von B. Wessler).

Die Lichterzeugung in einer LED basiert auf dem Phänomen der Elektrolumineszenz. Dabei emittiert ein Festkörper unter dem Einfluss eines elektrischen Stromes „kaltes“ Licht – im Gegensatz zur thermischen Lichtemission eines „heißen“ Glühfadens. Henry J. Round entdeckte dieses Phänomen 1907 an Kristallen aus Siliziumkarbid (SiC), an die er mithilfe von Metallkontakten Spannungen von bis zu 110 Volt anlegte [3]. Neben verschieden farbigem Licht beobachtete er, dass Stromfluss und Lichtemission stark vom Vorzeichen der angelegten Spannung abhängen, so wie man es von einer gleichrichtenden Diode kannte – die lichtemittierende Diode als optoelektronisches Bauteil war geboren. In den Jahren ab 1927 führte Oleg V. Losev weitergehende Untersuchungen an ähnlichen Proben durch [4].

In einem periodischen Kristall sind die Energieeigenzustände der Elektronen durch die Energiebänder



84 000 Leuchtdioden von OSRAM Opto Semiconductors in den Grundfarben rot, grün und blau beleuchten die „Aquarius Hall“ des Park Hotel Weggis in der Schweiz.

gegeben. „Fällt“ ein Elektron von einem höheren Band, dem Leitungsband, über die Bandlücke in ein niedrigeres Band, das Valenzband, kann ein Photon emittiert werden, dessen Wellenlänge der freiwerdenden Energie entspricht. Die Effizienz der LED, also der Wirkungsgrad der Umwandlung von elektrischer in optische Leistung, erreichte bei SiC-Leuchtdioden jedoch niemals Werte jenseits von etwa 0,001 bis 0,01 % [5], da SiC eine indirekte Bandlücke aufweist. Dies bedeutet, dass die Energie-Extrema von Leitungs- und Valenzband im Impulsraum nicht an der gleichen Stelle liegen.

KOMPAKT

- Kommerzielle Leuchtdioden beruhen heute meist auf den Legierungen AlInGaP für den roten bis grünen Spektralbereich bzw. AlInGaN für grün bis UV. Bei der Umwandlung von elektrischer Energie in Licht können sie eine Effizienz von über 50 % erreichen.
- Die aktive Zone, in der Elektronen und Löcher rekombinieren und das Licht entsteht, besteht aus vielen z. T. nur wenige Nanometer dünnen Schichten, die Atomlage für Atomlage aufgewachsen werden.
- Weißes Licht wird meist mit blauen Leuchtdioden erzeugt, in denen Leuchtstoffe einen Teil des blauen in gelbes Licht umwandeln.

Dipl.-Phys. Ansgar Laubsch, Dr. Matthias Sabathil, Dr. Berthold Hahn und Dr. Klaus Streubel, Osram Opto Semiconductors, Leibnizstr. 4, 93055 Regensburg

Da deshalb die Impulserhaltung bei einem Elektronenübergang nur schwer zu erfüllen ist, sind solche Prozesse in diesen Materialien sehr unwahrscheinlich.

Eine für effiziente Lichtemission günstigere direkte Bandlücke weisen viele III-V-Verbindungshalbleiter auf. In den 1950er-Jahren entdeckte Heinrich Welker diese Kristalle mit alternierender Anordnung von Atomen aus der dritten und fünften Hauptgruppe in den Laboratorien der Siemens-Schuckertwerke in Erlangen [6]. Seit den 1960er-Jahren werden sie zur Herstellung von LEDs eingesetzt [7]. Bei diesen Materialien liegen sich die Bandextrema häufig am Ursprung des Impulsraumes in Form einer sog. direkten Bandlücke gegenüber, sodass die Impulserhaltung bei einem Rekombinationsvorgang leichter zu erfüllen ist. Als wichtiger Meilenstein in dieser Materialklasse erreichte eine Leuchtdiode auf Basis von Galliumarsenid (GaAs) bereits 1966 eine Effizienz von 6 %, allerdings im infraroten Spektralbereich [8]. Aus der gleichen Zeit stammen erste LEDs im Sichtbaren, auf Basis der Legierungen Galliumarsenidphosphid ($\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$) für rote [9], Galliumphosphid mit Stickstoff-Fehlstellen (GaP:N) für grüne [10] und Galliumnitrid mit Zink-Fehlstellen (GaN:Zn) für blaue Emission [11]. Durch Variieren des Anteils x ($0 \leq x \leq 1$) bzw. mithilfe geeigneter Fehlstellen (N in GaP, Zn in GaN) lässt sich dabei die Übergangsenergie der Ladungsträger an die gewünschte Emissionswellenlänge anpassen. Die kontinuierliche Weiterentwicklung solcher Bauelemente führte auf die heute kommerziell fast ausschließlich verwendeten Legierungen $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{P}$ (im Folgenden mit AlInGaP bezeichnet) und $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ (AlInGaN), mit denen sich LED-Effizienzen von über 50 % erreichen lassen.

Das zentrale Element einer Leuchtdiode ist ein p-n-Übergang aus kristallinen dotierten Halbleiterschichten. In Vorwärtsrichtung betrieben, fließt im n- bzw. p-leitenden Gebiet ein elektrischer Strom aus Elektronen bzw. Löchern, die in den Bereich des p-n-

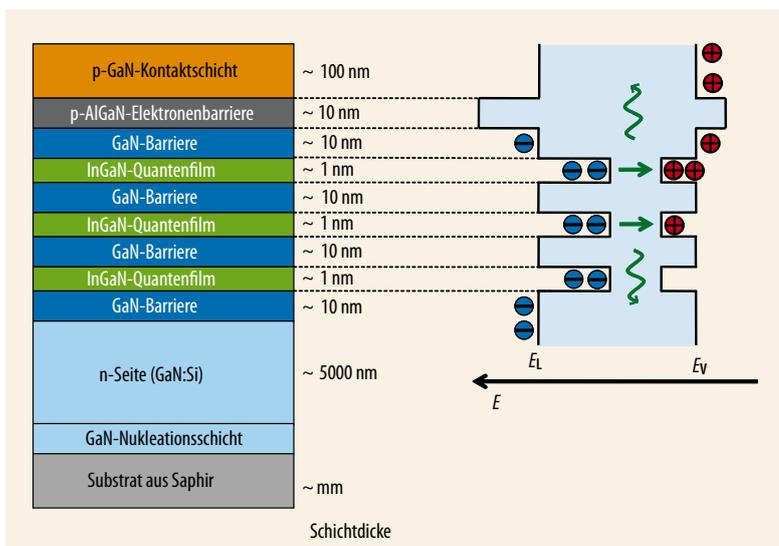


Abb. 1 Die aktive Zone einer LED aus AlInGaN besteht aus InGaN -Quantenfilmen mit GaN -Barrieren. Aufgrund des Verlaufs von Leitungs- und Valenz-

bandkante E_L bzw. E_V entstehen Potentialtöpfe (sog. Quantenfilme), welche die Ladungsträger lokalisieren.

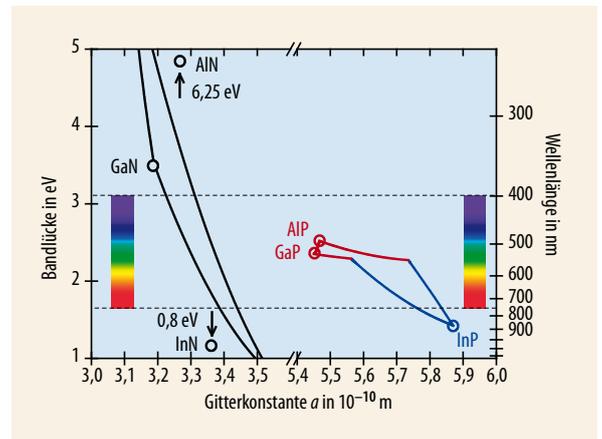


Abb. 2 Die Bandlücken und korrespondierenden (Vakuum-) Emissionswellenlängen der Legierungen $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ (schwarz) und $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{P}$ (blau, rot) hängen ebenso wie die Gitterkonstante a von der Zusammensetzung ab. So durchläuft z. B. das $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{P}$ -System für $x = 0$ und $0 \leq y \leq 1$ die Kurve zwischen GaP und InP . Das Abknicken der Kurven zu hohen Bandlücken in AlInGaP -Systemen markiert den Übergang von einer direkten (blau) zu einer indirekten Bandlücke (rot). Der Berechnung liegen die Materialparameter aus [12, 13] zugrunde.

Übergangs injiziert werden. Dort können Elektronen aus dem tiefsten unbesetzten Band (Leitungsband) mit Löchern aus dem höchsten besetzten Band (Valenzband) rekombinieren. Die frei werdende Energie kann als Licht („strahlend“) oder als Wärme („nichtstrahlend“) abgegeben werden.

Da die Effizienz einer solch einfachen LED-Struktur stark begrenzt ist, enthalten moderne hocheffiziente LEDs häufig mehrere sog. Quantenfilme im Bereich des p-n-Übergangs (Infokasten „Funktionsweise einer Leuchtdiode“). Eine dünne Halbleiterschicht aus einem Material mit geringerer Bandlücke als das umgebende Material bezeichnet man als Quantenfilm (*quantum well*), wenn für Ladungsträger innerhalb des Films Quantisierungseffekte auftreten. Die lichtemittierenden Quantenfilm-Schichten haben je nach Materialsystem nur eine Gesamtdicke von 10 bis wenigen 100 Nanometern, das gesamte kristalline Schichtpaket der p-n-Struktur ist einige Mikrometer dick. Hergestellt werden sämtliche Schichten üblicherweise mit einem Dünnschicht-Kristallwachstumsverfahren, in der Anwendung häufig mit der metallorganischen Gasphasenepitaxie. Dabei wachsen dünne kristalline Schichten bei hohen Temperaturen durch Abscheidung aus der Gasphase auf einem Substratmaterial („wafer“). Die atomaren Bestandteile der zu wachsenden Materialien entstehen durch Zersetzung von (vielfach metallorganischen) Prozessgasen auf der heißen Substratoberfläche.

Als Beispiel für eine Schichtstruktur zeigt Abb. 1 den Aufbau einer auf AlInGaN basierten LED. Die auf einem Saphirsubstrat gewachsene Struktur besteht im Wesentlichen aus p- bzw. n-dotierten Mantelschichten zur jeweiligen Kontaktierung und einer dazwischen befindlichen „aktiven Zone“ mit mehreren $\text{GaN/In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N/GaN}$ -Quantenfilm-Doppelheterostrukturen.

Das Material macht die Farbe

Für Leuchtdioden im sichtbaren Bereich des Spektrums kommen heute im Wesentlichen die beiden bereits erwähnten Materialsysteme zum Einsatz: AlInGaP für den langwelligen Abschnitt von grün über gelb zu rot sowie AlInGaN für kürzere Wellenlängen von grün über blau bis zum nahen UV. Die Bandlücke dieser Legierungen hängt von der Materialzusammensetzung ab (Abb. 2). Die Übergangsenergie E der Ladungsträger ist mit der Beziehung $E = hc/\lambda$ über die Lichtgeschwindigkeit c und das Plancksche Wirkungsquantum h direkt mit der (Vakuum-) Emissionswellenlänge λ verknüpft.

Die beiden Materialsysteme unterscheiden sich grundsätzlich hinsichtlich ihrer Kristallstruktur und ihres Wachstums. AlInGaP-Schichten lassen sich auf einem GaAs-Substrat mit der Struktur (Zinkblende) und der Gitterkonstante des Substrats aufwachsen. Wegen der guten kristallinen Anpassung und der hohen Qualität der verfügbaren Substrate wachsen die Schichten sehr homogen und defektarm, sodass LEDs mit bis zu 100 Quantenfilmen und gleichzeitig extrem hoher Effizienz möglich sind [2]. Bei Wellenlängen größer als 630 nm liegt die Effizienz von AlInGaP-basierten LEDs über 50 %, zu kürzeren Wellenlängen fällt sie jedoch drastisch bis unter 1 % bei 560 nm ab (Abb. 3). Dieser dramatische Rückgang liegt darin begründet, dass die Legierung eine maximale direkte Bandlücke von knapp 2,5 eV aufweisen kann. Dadurch ist es nicht möglich, den nötigen Energieabstand zwischen dem grün emittierenden Quantenfilm mit einer Bandlücke von etwa 2,3 eV und den umliegenden Schichten zu halten, sodass die Elektronen und Löcher thermisch angeregt aus dem aktiven Bereich entkommen können. Versuche, die Bandlücke der Barrieren auf anderen

Wegen, z. B. durch Verspannen der Schichten, zu erhöhen, waren bisher nicht erfolgreich.

Auch bei dem AlInGaN-System hängt die Effizienz stark von der Wellenlänge ab, allerdings mit gegenläufigem Trend zu AlInGaP, d. h. sie steigt von langen zu kurzen Wellenlängen hin an (Abb. 3). Daher lassen sich mit keinem der beiden Materialien effiziente grün-gelb emittierende LEDs herstellen. Die genaue Ursache dieses häufig als „Green Gap“ bezeichneten Phänomens wird in der Literatur noch kontrovers diskutiert. Anders als bei AlInGaP kann bei AlInGaN ein zu niedriges Einschlusspotential nicht den Abfall der Effizienz erklären, da die Effizienz mit zunehmender Tiefe des Potentialtopfes (also zu längeren Wellenlängen) abnimmt. Einige Aspekte des Problems, die mit zunehmender Emissionswellenlänge auftreten, sind jedoch bereits bekannt.

Der bedeutendste Unterschied zwischen dem Phosphid- und dem Nitrid-System besteht darin, dass AlInGaN ein hexagonaler Kristall ist, mit stark polarer Bindung zwischen dem Stickstoff und dem Metallatom aus der dritten Hauptgruppe. Da sich die Gitterkonstanten von GaN und InN um etwa 7 % unterscheiden, wachsen die $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ -Quantenfilme mit steigendem Indiumgehalt, also längerer Emissionswellenlänge, zunehmend verspannt auf dem GaN-Grundmaterial. Dies führt zu einer Entmischung des $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ -Materials, zu einer starken lateralen Inhomogenität des Indiumgehalts in der Wachstumsebene und zu Kristalldefekten. Darüber hinaus entsteht aufgrund der Verspannung ein piezoelektrisches Feld, das über den Quantenfilm abfällt. Dieses Feld verschiebt die Wellenfunktionen der quantisierten Elektron- und Lochzustände räumlich entgegengesetzt, sodass diese weniger überlappen und die Rate für strahlende Rekombination mit zunehmender Wellenlänge abnimmt.

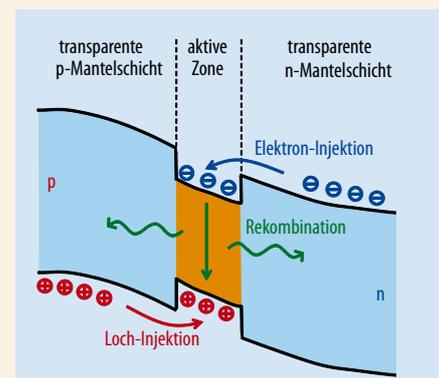
FUNKTIONSWEISE EINER LEUCHTDIODE

Eine LED, die nur aus einem einzelnen p-n-Übergang besteht (**Homoübergang**) hat mehrere Nachteile: Zum einen ist der Halbleiter nicht transparent für die emittierten Photonen und kann diese daher wieder absorbieren, was die Lichtemission und damit die Effizienz des Bauteils begrenzt. Zum anderen verteilen sich die Ladungsträger abhängig von ihrer charakteristischen Diffusionslänge in der Regel über ein großes Gebiet im Bereich des p-n-Übergangs, was zu einer niedrigen Volumladungsträgerdichte führt. Dies setzt die Wahrscheinlichkeit für strahlende Rekombination herab, die das Zusammentreffen eines Elektrons und eines Lochs erfordert. Gleichzeitig erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für nichtstrahlende Prozesse relativ dazu, da diese Prozesse häufig über den Einfang eines einzelnen Ladungsträgers durch einen lokalisierten Defektzustand ablaufen.

Diese Probleme lassen sich mit einer Halbleiter-**Doppelheterostruktur** reduzieren (Abb.). Diese enthält im Bereich des p-n-Übergangs eine Schicht aus einem zweiten Material mit

einer reduzierten Bandlücke. Elektronen und Löcher werden über die n- und p-Schichten mit großer Bandlücke in diese Schicht injiziert und in dem entstehenden Potentialtopf stärker lokalisiert. Gleichzeitig ist die Energie der emittierten Photonen im Vergleich zum Homoübergang geringer, sodass das umgebende Material transparent für das emittierte Licht ist und dieses die aktive Zone ungehindert verlassen kann. Liegt die Differenz der Bandlücken von eingebetteter Schicht und Mantelschicht in der Größenordnung thermischer Energien, wie es bei Bauteilen aus AlInGaP möglich ist, können die Ladungsträger die Potentialtöpfe allerdings auch wieder verlassen und in den umliegenden Schichten meist nichtstrahlend rekombinieren. Dies setzt die Effizienz des Bauteils wiederum herab.

Falls die Dicke der eingebetteten Schicht wenige Nanometer beträgt, entstehen in dem Potentialtopf quantisierte Zustände für die Ladungsträger; man spricht von einem Quantenfilm. Besonders im Materialsystem AlInGaN



Bei einer Leuchtdiode mit einer Doppelheterostruktur bilden die Leitungs- und Valenzbandkanten im Bereich des p-n-Übergangs Potentialtöpfe, die die injizierten Elektronen und Löcher lokalisieren.

führen Verschiebungen dieser quantisierten Zustände durch den Einfluss piezoelektrischer Felder im InGaN zu besonderen Effekten, die die Elektrolumineszenz direkt beeinflussen.

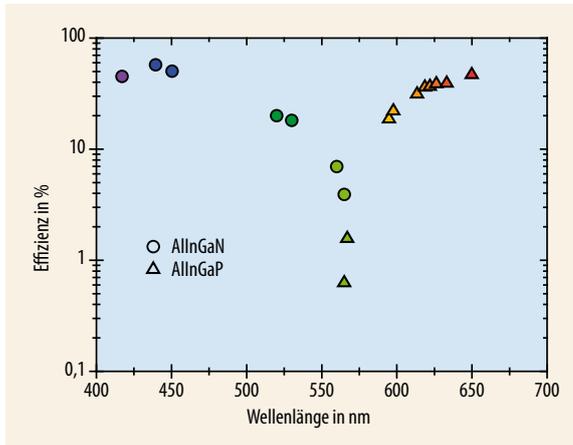


Abb. 3 Die Effizienz für die Konversion von elektrischer zu optischer Leistung hängt für Leuchtdioden aus AlInGaN und AlInGaP stark von der Wellenlänge ab. Im grün-gelben Spektralbereich stehen keine effizienten LEDs zur Verfügung.

Schließlich nimmt bei AlInGaN-LEDs die Bauteileffizienz mit zunehmendem Betriebsstrom kontinuierlich ab. Die Ursache dafür ist noch umstritten [14], eine mögliche Erklärung wären Verluste über Auger-Rekombination. Dabei wird die Rekombinationsenergie eines Elektron-Loch-Paares nicht an ein Photon abgegeben, sondern an ein drittes Teilchen (Loch oder Elektron). Die Auger-Rekombination tritt als Dreiteilchenprozess hauptsächlich bei hohen Ladungsträgerdichten auf. Aktuelle Rechnungen mit Dichtefunktionaltheorie deuten darauf hin, dass ein Auger-Prozess mit zunehmendem Indiumgehalt deutlich wahrscheinlicher werden kann [15]. Weitere Untersuchungen müssen klären, ob der Auger-Effekt den Abfall der Effizienz sowohl zu hohen Betriebsströmen als auch zu langen Wellenlängen erklären kann.

Vom Kristall zum elektronischen Chip

Die Gesamteffizienz η einer Leuchtdiode ergibt sich als Produkt einzelner Effizienzen, die jeweils in verschiedenen Teilen des Design- und Herstellungsprozesses zu optimieren sind (vgl. den Artikel von B. Wessler). Zunächst bestimmt das Design der Halbleiterstruktur die Injektionseffizienz der Ladungsträger in die Quantenfilme der aktiven Zone sowie den Quantenwirkungsgrad, d. h. die Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron-Loch-Paar strahlend rekombiniert. Für eine hohe Gesamteffizienz ist aber auch entscheidend, wie die

beschichteten Substratscheiben zu einzelnen Chips prozessiert werden. Davon hängt z. B. die optische Extraktionseffizienz ab, das ist der Anteil der in der aktiven Zone erzeugten Photonen, die den Chip als nutzbares Licht verlassen können. Das Problem, eine hierfür möglichst geeignete optische Struktur zu finden, soll das Beispiel von LEDs aus AlInGaN veranschaulichen.

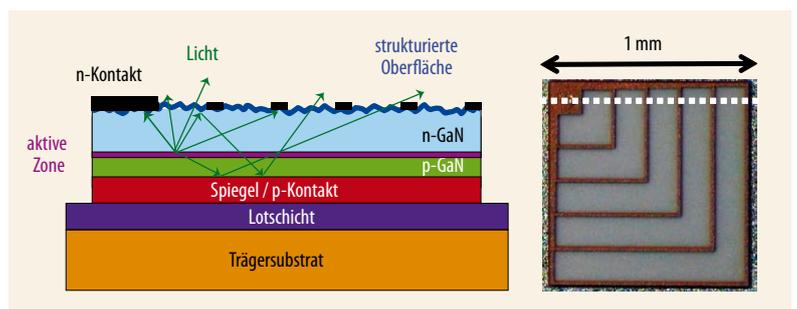
Im sichtbaren Spektralbereich beträgt der Brechungsindex von GaN 2,33, das entspricht einem Winkel der Totalreflexion von $25,4^\circ$ an der Grenzfläche zu Luft. Licht, das außerhalb dieses engen Austrittskegels auf die Grenzfläche fällt, kann das Material daher nicht verlassen. Stattdessen wird es innerhalb des Materials vielfach reflektiert und zum großen Teil absorbiert, bevor es „entkommen“ könnte.

Um die Auskopplung von Licht zu optimieren, ist es daher wichtig, dass kein optischer Resonator innerhalb des Chips entsteht, sondern dass „Fehler“ an der Oberfläche Lichtleitung durch Vielfachreflexion weitgehend verhindern und gleichzeitig die Lichtauskopplung ermöglichen. Weiterhin müssen alle Grenzflächen, an denen sich Reflexion nicht vermeiden lässt, möglichst reflektiv sein. Schließlich gilt es, lichtabsorbierende Schichten im Chip zu vermeiden.

Leuchtdioden mit möglichst hoher Gesamtstrahlungsleistung lassen sich als einzelne Chips realisieren, wenn man die emittierende Chipfläche oder den Betriebsstrom erhöht. Wegen der zuvor beschriebenen Hochstromverluste bei Lichtemittern auf AlInGaN-Basis, aber auch wegen der großen Abwärme, ist es häufig nur in geringem Umfang möglich, die Stromdichte zu steigern. Eine denkbare Lösung besteht darin, mehrere kleine Chips zu verwenden. Dies erschwert jedoch zum einen optische Designs, die die hohe Leuchtdichte von LEDs optimal ausnutzen sollen. Zum anderen steigen Fertigungsaufwand und Fehleranfälligkeit, wenn viele kleine Chips zu einem Bauteil mit Gehäuse zu verarbeiten sind. Um die Anforderungen verschiedener Anwendungen flexibel erfüllen zu können, bietet sich daher ein Chipdesign an, das sich bezüglich der Chipfläche skalieren lässt.

Die Dünnschicht-LED vereinbart diese Skalierbarkeit mit einer optimalen Lichtextraktion (Abb. 4). Der untere spiegelnde Kontakt, die raue Oberfläche und die kleinflächigen n-seitigen Kontaktstege ermöglichen eine sehr gute Lichtauskopplung. Außer mit dem oberen Kontaktgitter kommt im Quantenfilm entstehendes Licht mit keinen weiteren stark absorbierenden Strukturen mehr in Berührung. Während eine glatte

Abb. 4 Bei einem Dünnschicht-LED-Chip sorgen eine raue Oberfläche und ein gut reflektierender p-Kontakt für eine möglichst gute Lichtauskopplung. Das Schnittbild links entspricht der gestrichelten weißen Linie in der Mikroskopaufnahme rechts.



Oberfläche den nicht direkt austretenden, unter einem Winkel oberhalb des Totalreflexionswinkels emittierten Lichtanteil in eine geführte Mode reflektieren würde, streut die raue Oberfläche das Licht unter einem statistisch verteilten Winkel (ergodisch). Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit, dass nicht direkt emittiertes Licht nach erneuter Reflexion an der spiegelnden Schicht im Austrittslichtkegel liegt. In einer geführten Mode könnte Licht durch die zahlreichen Reflexionen an den trotz aller Optimierung nie ganz perfekten Spiegeln und durch Ausbreitung in immer noch leicht absorbierenden Medien nach wenigen Umläufen im Resonator absorbiert werden. Die raue Dünnschichtstruktur vermindert also interne Vielfachdurchgänge des erzeugten Lichts und erhöht damit die Effizienz der Auskopplung. Yablonoich hat das zugrundeliegende Prinzip vorgeschlagen, um die Absorption von Solarzellen zu verbessern [16], und später mit Schnitzer auf GaAs-basierte Lichtemitter übertragen [17]. OSRAM Opto Semiconductors hat erstmals Dünnschicht-LEDs industriell gefertigt, zunächst auf AlInGaP-Basis [18] und später unter dem Namen ThinGaN auch auf AlInGaN-Basis [19–21].

Aus blau und gelb wird weiß

Das menschliche Auge nimmt Farben über drei unterschiedliche Typen von lichtempfindlichen Sinneszellen wahr (vgl. Artikel von K. Vamberszky und S. Wick). Das Maximum ihrer jeweiligen Sensitivität befindet sich im blauen, im grünen bzw. im roten Spektralbereich, die Empfindlichkeitskurven sind jedoch spektral sehr breit. Stimuliert eine Lichtquelle die drei Rezeptortypen ungefähr gleich stark, so nimmt der Mensch ihre Emission als „weiß“ wahr. Die Emission einer einzelnen LED hat jedoch meist ein spektral schmales Emissionsspektrum – aufgrund der relativ definierten Energieniveaus, die zur Lichterzeugung beitragen. Um mit Leuchtdioden einen weißen Lichteindruck zu erzielen, werden daher normalerweise verschiedene Emissionsfarben gemischt.

Der direkteste Ansatz besteht darin, je eine blaue, grüne und rote LED zu verwenden und ihre Helligkeiten so zu wählen, dass ein weißer Farbeindruck entsteht. Da wie bereits erwähnt derzeit keine hocheffizienten grünen LEDs existieren, ist dabei die Gesamteffizienz allerdings begrenzt. Außerdem unterscheiden sich die einzelnen LED-Typen des Gesamtbauteils darin, wie stark Emissionsleistung und Spektrum von der Temperatur abhängen oder wie die Emissionsleistung mit der Zeit degradiert. Daher ist es während des Lebenszyklus des Bauteils und je nach den aktuellen Betriebsbedingungen erforderlich, den Anteil der einzelnen LEDs zur Gesamtemission ständig zu messen und aktiv nachzuregulieren. Dies macht die technische Realisierung einer solchen weißen Lichtquelle sehr aufwändig. Ähnliche Nachteile hat eine die Technologie konventioneller Leuchtstoffröhren nachahmende Lösung mit im nahen Ultravioletten emittierenden LEDs, bei denen verschiedene Konverterleuchtstoffe

das UV-Licht vollständig absorbieren und sichtbares Licht unterschiedlicher Farbe so emittieren, dass weißes Licht entsteht.

Die technisch am weitesten verbreitete Lösung ist die Kombination einer blauen LED mit einem gelb emittierenden Leuchtstoff, der die LED bedeckt (Abb. 5). Im Betrieb gelangt ein Teil des blauen Lichts direkt nach außen, der Rest wird vom Leuchtstoff absorbiert und als gelbes Licht reemittiert. Ein Konvertermaterial mit einer verglichen zu LEDs deutlich höheren spektralen Linienbreite ermöglicht es, sowohl die grün- als auch die rotempfindlichen Lichtrezeptoren mit ihren spektral breiten Empfindlichkeitskurven zu gleichen Anteilen zu stimulieren, sodass zusammen mit dem blauen Licht der LED weißes Licht entsteht. Als gelbe Wellenlängenkonverter dienen häufig Granate, die mit verschiedenen Leuchtzentren aus der Gruppe der Seltenen Erden dotiert sind, z. B. Cer-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat (YAG:Ce). Verluste entstehen zum einen durch die beschränkte Konversionseffizienz der Leuchtstoffe, also das Verhältnis aus konvertierten zu absorbierten Photonen, das allerdings häufig relativ hoch bei 90 % liegt. Zum anderen geht zusätzlich bei jedem einzelnen Konversionsvorgang Energie verloren, weil ein „blaues“ Photon in ein „gelbes“ umgewandelt wird. Im Beispiel liegt dieser sog. Stokes-Verlust bei etwa 20 %.

Um herkömmliche weiße Leuchtmittel durch Leuchtdioden ersetzen zu können, müssen über die weiße Farbe hinaus auch die Farbtemperatur und der Farbwiedergabeindex stimmen. Eine niedrige Farbtemperatur von 2000 bis 3000 K, wie sie für Glühbirnen typisch ist, bedeutet in Anlehnung an das Emissionsspektrum eines schwarzen Strahlers der entsprechenden Temperatur eine rötliche Färbung des weißen Lichts, eine hohe Farbtemperatur eine bläuliche. Da die Menschen in westlichen Ländern rötliche Weißtöne niedriger Farbtemperatur bevorzugen, mischt man bei blauen LEDs mit einem gelben Konverterstoff häufig einen zusätzlichen rot emittierenden Konverter bei oder setzt eine zusätzlich rot emittierende LED ein. Als weitere charakteristische Größe gibt der Farbwiedergabeindex die Fähigkeit einer Lichtquelle an, die natürliche Farbe von verschieden gefärbten Objekten wiederzugeben. Die Kombination mehrerer Leuchtstoffe oder verschiedenfarbiger LEDs ermöglicht eine breite spektrale Verteilung des emittierten Lichts, sodass man eine gute Farbwiedergabe erreicht.

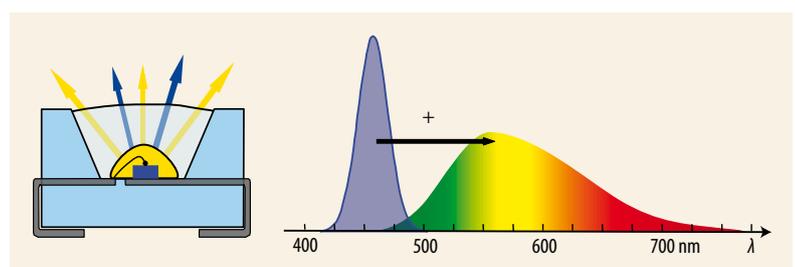


Abb. 5 Eine blaue Leuchtdiode erzeugt durch Teilkonversion mit einem gelben Leuchtstoff (links) ein Emissionsspektrum, das weißem Licht entspricht (rechts).

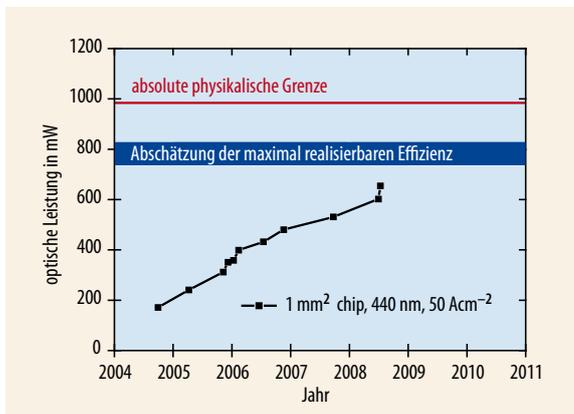


Abb. 6 Die optische Emissionsleistung bei Nennstromdichte von blau emittierenden Hochleistungs-LEDs bei OSRAM Opto Semiconductors ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen (schwarz), hat die nach jetzigem Stand der Technologie mögliche Grenze aber noch nicht erreicht (blau) [1, 22]. Die durch Energieerhaltung gegebene absolute physikalische Grenze liegt nochmal deutlich höher (rot).

Rein in den Markt

Im Moment befindet sich die LED-Technologie in einem sehr spannenden Übergang von der rein technologisch getriebenen Entwicklung, in der die Effizienz der LEDs rasant gestiegen ist (**Abb. 6**), hin zu der Phase des eigentlichen Eintritts in den Beleuchtungsmarkt. Die führenden Firmen haben sich in den letzten Jahren sehr auf die technische Performance der Bauteile konzentriert und Effizienzen erreicht, die diejenigen der meisten herkömmlichen Lichtquellen weit übertreffen. Den größten einzelnen Anteil an den verbleibenden Verlusten hat bei den für weiße Lichtquellen eingesetzten AlInGaN-LEDs der Abfall der internen Effizienz mit Stromdichte und Wellenlänge. Daher arbeiten weltweit viele Firmen und Forschungslabors mit Hochdruck an der Lösung dieses Problems. Weiterhin sind Verbesserungen bei der Lichtkonversion zu erwarten.

Damit eine Leuchtdiode allerdings herkömmlichen Lichtquellen Konkurrenz machen kann, sind noch einige weitere Herausforderungen zu überwinden. So sind z. B. effiziente und kompakte Vorschaltgeräte nötig, die Kühlung der LED muss gewährleistet sein, und nicht zuletzt müssen die Kosten sinken. Das Ziel ist, nicht nur das einzelne Bauteil, sondern die Gesamtlösung zu optimieren und für den Kunden so attraktiv zu machen, dass er auch einen anfänglich höheren Preis in Kauf nimmt. Dabei sind sog. Retrofits, also ein direkter Ersatz für Glühlampen und Kompaktleuchtstofflampen mit einem Edison-Sockel, nur der Anfang. In Zukunft sind mithilfe von LEDs völlig neue Leuchten möglich, die neben der herausragenden Effizienz sowohl die Kompaktheit der Lichtquelle als auch ihre Flexibilität beispielsweise in Design und adaptiver Farb- und Helligkeitssteuerung nutzen, um eine neue Qualität des Lichtes in die Beleuchtung zu bringen.

Literatur

- [1] J. Baur et al., Phys. Stat. Sol. (c) **6**, S905 (2009)
- [2] R. Windisch et al., IEEE Phot. Tech. Lett. **19**, 774 (2007)
- [3] H. J. Round, El. World **49**, 309 (1907)
- [4] O. V. Losev, Phil. Mag. **6**, 1024 (1928)
- [5] R. M. Potter et al., J. Appl. Phys. **40**, 2253 (1969)
- [6] H. Welker, Z. Naturforsch. **7a**, 744 (1952)
- [7] E. F. Schubert, Light-Emitting Diodes, Cambridge University Press, Cambridge (2003)
- [8] H. Rupprecht et al., Appl. Phys. Lett. **9**, 221 (1966)
- [9] N. Holonyak Jr. et al., Appl. Phys. Lett. **1**, 82 (1962)
- [10] R. A. Logan et al., Appl. Phys. Lett. **13**, 139 (1968)
- [11] J. I. Pankove et al., J. Luminescence **4**, 63 (1971)
- [12] I. Vurgaftman et al., J. Appl. Phys. **89**, 5815 (2001)
- [13] I. Vurgaftman et al., J. Appl. Phys. **94**, 3675 (2003)
- [14] A. Laubsch et al., Phys. Stat. Sol. (c) **6**, S913 (2009)
- [15] K. T. Delaney et al., Appl. Phys. Lett. **94**, 191109 (2009)
- [16] E. Yablonovich, Phys. Rev. Lett. **58**, 2059 (1987)
- [17] I. Schnitzer et al., Appl. Phys. Lett. **62**, 131 (1993)
- [18] K. Streubel et al., IEEE J. Sel. Top. Quant. El. **8**, 321 (2002)
- [19] V. Haerle et al., Proc. SPIE **4996**, 133 (2003)
- [20] V. Haerle et al., Phys. Stat. Sol. (a) **201**, 2736 (2004)
- [21] B. Hahn et al., Proc. WOCSDICE 2007, 3 (2007)
- [22] A. Laubsch et al., IEEE Trans. Electron Devices, DOI 10.1109/TED.2009.2035538

DIE AUTOREN

Ansgar Laubsch (FV Halbleiterphysik und Quantenoptik/Photonik) arbeitet aktuell in der Entwicklung bei OSRAM Opto Semiconductors. Nach seinem Physikstudium an der RWTH Aachen und einer Diplomarbeit am FZ Jülich ging er 2005 zu OSRAM und fertigte in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik und der Uni Freiburg eine Doktorarbeit über die Mechanismen an, die die Effizienz von AlInGaN-basierten Leuchtdioden limitieren.



Matthias Sabathil wechselte nach seiner Promotion in Physik an der TU München 2004 zu OSRAM nach Regensburg, wo er an der Modellierung der Bauteileigenschaften und der internen Prozesse in AlInGaN-basierten Hochleistungsleuchtdioden arbeitete. Seit 2009 leitet er die Modellierungsabteilung.

Berthold Hahn (FV Halbleiterphysik) promovierte 1998 an der Uni Regensburg in Physik. Danach wechselte er zu OSRAM und leitete mehrere Epitaxie- und Produktentwicklungsprojekte für AlInGaN-basierte Hochleistungs-LEDs. Seit 2008 leitet er die LED-Chipentwicklung.



Klaus Streubel (FV Halbleiterphysik) studierte Physik in Stuttgart und promovierte dort 1990. Anschließend arbeitete er am Swedish Institute of Microelectronics und später an der Königlich Technischen Hochschule in Stockholm, wo er sich habilitierte und eine Stelle als adjungierter Professor übernahm. Nach einem Wechsel

1997 in die industrielle Forschung bei Mittel Semiconductors in Järfälla, Schweden, kam er 1999 zu OSRAM nach Regensburg. Seit 2009 ist er Leiter der Forschung und Entwicklung bei der OSRAM GmbH in München.