

Physik-Nobelpreis 2014

Lichtquellen der Zukunft

Isamu Akasaki, Hiroshi Amano und Shuji Nakamura erhalten den diesjährigen Physik-Nobelpreis für die Erfindung effizienter blauer LEDs. Mit ihrer Erfindung haben die Preisträger eine Lichtrevolution eingeleitet.

Die Lichterzeugung bei LEDs basiert auf Elektrolumineszenz. Seit über einhundert Jahren ist dieses Phänomen bekannt – 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 (GaAs) erste kommerzielle Leuchtdioden (LED) ermöglichte. Und erst in den letzten Jahren haben hocheffiziente blaue LEDs den Weg bereitet für weiße Leuchtdioden, die aufgrund ihrer heute hohen Effizienz (bis zu 80 Prozent) und Lebensdauer in fast allen Bereichen Glühlampen und andere Lichtquellen ablöst haben.

Henry Joseph Round entdeckte den Elektrolumineszenzeffekt schon 1907 an Kristallen aus Siliziumkarbid (SiC), an die er Spannungen bis zu 110 Volt anlegte. Neben verschiedenfarbigem Licht beobachtete er, dass Stromfluss und Lichtemission stark vom Vorzeichen der angelegten Spannung abhingen – die lichtemittierende Diode als optoelektronisches Bauteil war geboren, geriet jedoch vorerst wieder in Vergessenheit. Als eigentlicher Erfinder der Elektrolumineszenz gilt Georges Destriau, der 1936 eine Lichtemission an Zinksulfid (ZnS) beobachtete. Aber erst die Entdeckung der III-V-Halbleiter, wie Galliumarsenid, ermöglichte 1962 die erste kommerzielle rote Leuchtdiode, allerdings mit noch geringer Lichtausbeute. Bis in die 90er Jahre sollte es dauern, ehe die erste effiziente blaue LED leuchtete und den Weg für weiße Leuchtdioden bereitete.

Die Theorie

In einem periodischen Kristall sind die Energieeigenzustände der Elektronen durch die Energiebänder 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 aktive Zone, in der Licht emittiert wird, ist der p-n-Übergang, das zentrale Element einer Leuchtdiode. Er besteht 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-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. Die Effizienz einer solch einfachen LED-Struktur ist jedoch stark begrenzt. Moderne hocheffiziente LEDs enthalten häufig mehrere sogenannte Quantenfilme im Bereich des p-n-Übergangs. Ein Quantenfilm (quantum well) bezeichnet eine dünne Halbleiterschicht (10 bis wenige 100 Nanometer) aus einem Material mit geringerer Bandlücke als das umgebende Material, wenn für Ladungsträger innerhalb des Films Quantisierungseffekte auftreten.

Die Effizienz erreichte bei SiC-Leuchtdioden, wie Round sie verwendete, nur Werte von etwa 0,001 bis 0,01 %, denn SiC weist eine indirekte Bandlücke auf. Das heißt, dass die Energiemaxima von Leitungs- und Valenzband im Impulsraum nicht an der gleichen Stelle liegen. Die Impulserhaltung bei einem Elektronenübergang ist daher nur schwer zu erfüllen, denn Übergänge in indirekten Bandlücken sind weniger wahrscheinlich als Übergänge in direkten Bandlücken. Für die effiziente Lichtemission eignen sich direkte Bandlücken besser, die viele der III-V-Verbindungshalbleiter haben. Wichtiger Meilenstein in dieser Materialklasse waren die ersten LEDs im sichtbaren Bereich – auf Basis von Galliumarsenidphosphid (GaAsxP_{1-x}) für rote (1962), auf Basis von Galliumphosphid mit Stickstoff-Fehlstellen (GaP:N) für grüne LED.

Der Weg zur weißen LED war noch weit, denn weißes Licht lässt sich nicht direkt erzeugen. Es entsteht stets aus einer additiven Farbmischung. Neben Rot benötigt man auch effiziente Lösungen für die Spektralfarben Grün und Blau. Anfang der 90er Jahre forschte man daher nach einer neuen Materialklasse. Als aussichtsreich galt dafür zunächst die Gruppe der II/VI-Halbleiter der Zinkselenid-Gruppe (ZnSe) – gut zu dotieren und mit direkter Bandlücke, im Vergleich zu III/V-Halbleitern jedoch nur mit geringer Festigkeit. Eine alternative Materialklasse stellten Nitridische Halbleiter dar, deren Herstellung in der für LEDs nötigen Qualität jedoch sehr anspruchsvoll war. Ein Nitrid-System wie AlInGaN ist ein hexagonaler Kristall, mit stark polarer Bindung zwischen Stickstoff und dem Metallatom aus der dritten Hauptgruppe. Da GaN im ultravioletten emittiert, muss die Bandlücke durch Zugabe von Indium in den blauen Spektralbereich verschoben werden. 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 y , also längerer Emissionswellenlänge, zunehmend verspannt auf dem GaN -Grundmaterial. Folgen sind eine starke laterale Inhomogenität des Indiumgehalts in der Wachstumsebene und Kristalldefekte. Außerdem gab es für die Abscheidung der dünnen Halbleiterschichten keine passenden Wirtskristalle, denn Nitridhalbleiter lassen sich extrem schwer als Einkristalle herstellen. Als besser geeignet erwies sich Saphir, mit einer

ähnlichen Kristallstruktur, aber abweichender Gittergröße. Es mussten jedoch neuartige komplexe Kristallzuchtungsansätze entwickelt werden.

Die Lösung

Isamu Akasaki arbeitete seit 1974 an diesem Problem. Zusammen mit Hiroshi Amano entwickelte er die grundlegenden Methoden für die Abscheidung der Kristalle in der entsprechenden Qualität. Für die Erzeugung effizienter LEDs wird ein p-n-Übergang und damit ein definierter p-dotierter Bereich benötigt. Als möglicher Dotierstoff war bereits Magnesium bekannt. Allerdings zeigten alle hergestellten Schichten keine oder lediglich n-Leitung. Ausreichend p-dotiertes GaN war bis zu den Arbeiten der beiden japanischen Forscher nicht nachgewiesen worden. Den Durchbruch brachte die Beobachtung, dass GaN Schichten, die während materialwissenschaftlicher Untersuchungen mit Elektronen bestrahlt wurden, p-Leitung zeigten. Damit waren die grundlegenden materialwissenschaftlichen Ansätze vorhanden. Der japanische Industrieforscher Shuji Nakamura griff diese Erkenntnisse auf und entwickelte die Kristallzuchtung sowie das Bauteildesign von der Materialforschung bis zur ersten industrietauglichen blauen Leuchtdiode weiter. 1992 wurde dann die erste helle blaue Leuchtdioden präsentiert und damit eine Lichtrevolution eingeleitet.

Die dabei entwickelten Strukturen waren so erfolgreich, dass sie heute noch den größten Anteil der produzierten LED-Architekturen ausmachen. Für diese bahnbrechende Erfindung haben Akasaki, Amano und Nakamura den diesjährigen Physik-Nobelpreis erhalten, ganz im Sinne Alfred Nobels, der großen Wert auf Erfindungen und Entdeckungen legte, die einen großen Nutzen für die Menschheit haben.

Bildunterschriften

Bild 1

((hier sind schon zwei mögliche BU in der Grafik selbst enthalten, ich würde die Grafik entsprechend bearbeiten, das heißt, den Text rausnehmen, und einen Teil davon als BU verwenden, den 2. Teil unter dem Bild))

Bild 2

Weißes Licht lässt sich nicht direkt erzeugen, es entsteht immer aus einer additiven Farbmischung

Bilder: Osram Opto Semiconductors