

In-situ-Messtechnik für die LED-Produktion:

Emissionsspektrum während der Fertigung prüfen und korrigieren



Im Rahmen einer aktuellen Promotion wurde eine neue Methode zur Überwachung von LED-Produktionsprozessen entwickelt. Hersteller können damit die Emissionsspektren erstmals bereits während des Halbleiter-Schichtwachstums kontrollieren und präzise nachjustieren.

Von Dr. Christoph Prall, Prof. Dr. Daniel Erni und Prof. Dr. Dirk Rüter

Raumbeleuchtungen auf Basis von festkörperbasierten Leuchtmitteln sind weit verbreitet. Aufgrund ihrer Lichtausbeute und Langlebigkeit sind sie herkömmlichen Energiesparlampen und klassischen thermischen Lichtquellen überlegen. Meist wird mittels einer blauen Licht emittierenden Diode (LED) sekundär ein

Leuchtstoff zur Emission von gelbem Licht angeregt. Die Summe aus dieser angeregten gelblichen Emission des Leuchtstoffes und des Restlichts der anregenden blauen LED wird vom menschlichen Auge als weißes Licht empfunden. Ausgangsstoffe für die anregende blaue LED sind in der Regel die binären und ternären III-V-Halbleiterverbindungen Gallium-Nitrid (GaN) und Indium-Gallium-Nitrid (InGaN). Die Emissionswellenlänge hängt dabei vom relativen Indiumgehalt sowie von der Dicke der aktiven Zone der LED-Quantenpotf-Schichten ab.

Kritischer Herstellungsparameter indirekt gemessen

Während des Schichtwachstums bei Prozesstemperaturen um 1000 °C haben

bereits kleinste Temperaturschwankungen im Promillebereich einen erheblichen Einfluss auf den Indiumgehalt und somit auf die resultierende Emissionswellenlänge der produzierten LED. Aufgrund des komplexen Aufbaus industrieller Produktionsanlagen sind Temperaturmessungen direkt an der Halbleiterschicht nur unter erschwerten Bedingungen realisierbar. Die Temperatur wird in der Regel aus der Wärmestrahlung im Infrarotbereich am darunterliegenden Probenträger eines Halbleiter-Wafers bestimmt. Durch unerwünschte Effekte wie Substratverkrümmung kann es zu erheblichen Temperaturdifferenzen zwischen Probenträger und wachsender Halbleiterschicht kommen.

Gegenwärtig wird zur Bestimmung der Emissionswellenlänge einer produzierten LED das Prinzip der Photolumineszenz (PL) angewendet. Das geschieht jedoch erst ex situ, also außerhalb der Produktionsanlage nach abgeschlossenem Kristallwachstum der Halbleiterschichten. Eine Korrektur der Halbleiterschichten ist zu diesem Zeitpunkt nicht mehr möglich. Sollten hier trotzdem Abweichungen festgestellt werden, kann nur in den darauffolgen-



Bild 1. Dr. Christoph Prall war einer von 14 kooperativen Promotionsstudenten der Hochschule Ruhr West in Mülheim. Im Rahmen seiner Dissertation erweiterte er die Photolumineszenz-Messverfahren auf den Hochtemperaturbereich. (Bild: S. Finke)

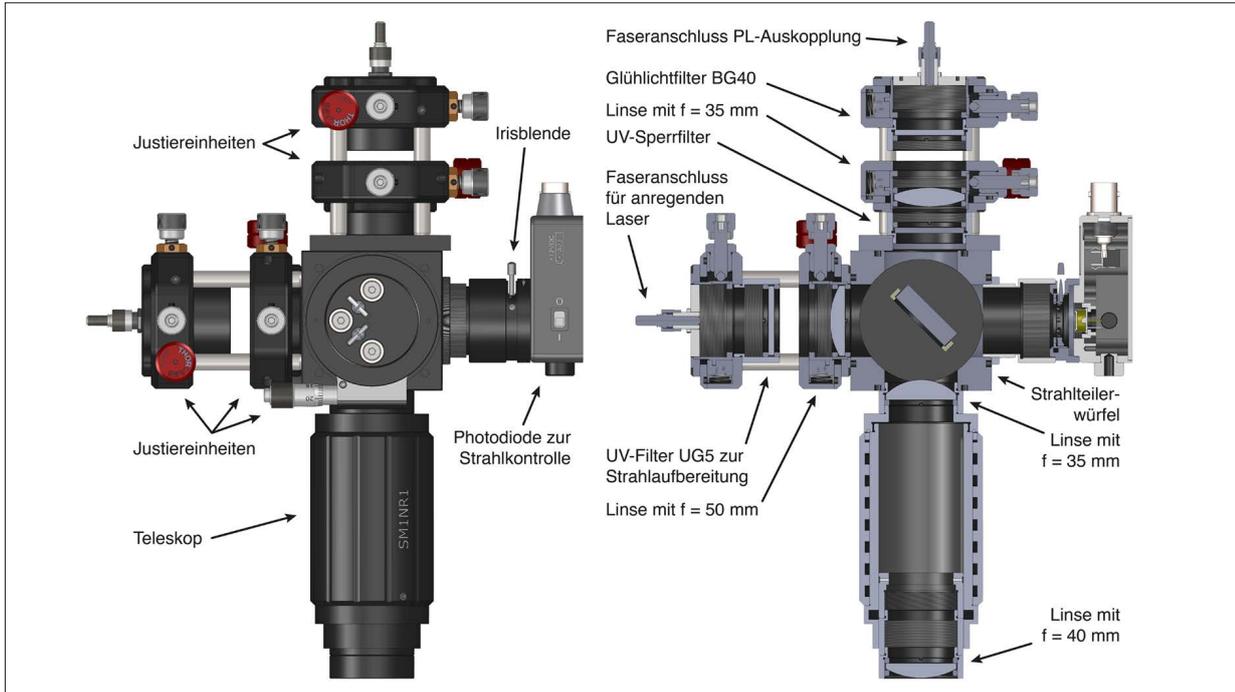


Bild 2. Messkopf zur In-situ-Messung an industriellen Epitaxie-Anlagen in geschlossener Ansicht (links) und im Querschnitt (rechts). Die integrierte Photodiode dient zur Kontrolle des Anregungslasers. (Bild: C. Prall)

den Produktionsprozess der nächsten LED-Charge eingegriffen werden und gegebenenfalls muss die vorgängige Charge als Ausschuss abgeschrieben werden. Dadurch fallen Ausbeute und Effizienz des ohnehin schon sehr kostenintensiven Produktionsprozesses.

Hochtemperatur-Messverfahren

Im Rahmen einer kooperativen Promotion (Bild 1) an der Universität Duisburg-Essen und der Hochschule Ruhr West wurde ein In-situ-Hochtemperatur-Messverfahren entwickelt, mit dem das PL-Spektrum direkt an der Wachstumsfront während des Schichtwachstums einer LED-Struktur bestimmt werden kann. Hierbei wird unter Einsatz von gepulstem UV-Laserlicht eines frequenzverdreifachten Nd:YAG-Lasers eine ausreichend hohe Anregungsdichte bereitgestellt, um auswertbare PL-Emissionen auch innerhalb der heißen Produktionsanlage detailliert detektieren zu können. Dies geschieht im Zeitraum von Nanosekunden und somit ohne das betrachtete Halbleitermaterial zu beschädigen. Dafür wurde ein Messkopf entwickelt (Bild 2). Dort wird das Licht des anregenden Lasers zunächst UV-gefiltert, parallelisiert und über einen Strahlteilerwürfel und eine Teleskopanordnung auf die zu messende Oberfläche fokussiert. Die dort an-

geregte Photolumineszenz wird durch dieselbe Teleskopanordnung aufgefangen, über Filter vom anregenden Restlaserlicht und Glühlicht separiert und über eine Linse in einen Faseranschluss fokussiert, der zu einem Spektrometer führt.

Die PL-Messung wird durch die hohen Temperaturen im Produktionsprozess erschwert. Dadurch kommt es bei der PL-Anregung zu temperaturaktivierten, nichtstrahlenden Rekombinationsprozessen innerhalb des Halbleiters. Dieser Prozess ist unerwünscht, da er der strahlenden PL-Emission entgegenwirkt und sie insgesamt stark mindert. Mit gepulstem UV-Anregungslaserlicht können die nichtstrahlenden Rekombinationsprozesse jedoch ausreichend gesättigt werden,

wodurch klar auswertbare PL-Emissionsspektren auch bei den sehr hohen Prozesstemperaturen zur Verfügung stehen.



SPECTRUM Instrumentation GmbH

Ahrenfelder Weg 13-17
DE 22927 Grosshansdorf
Tel. 04102-6956-0
info@spec.de
www.spectrum-instrumentation.com

Highlights

5 Jahre Gewährleistung! Alle Produkte werden komplett in Deutschland entwickelt, hergestellt und getestet.

Firmenprofil

- Gründungsjahr: 1989
- Mitarbeiter: 18

Zielmärkte

- Digitizer-Karten für PC
- AWG Generator-Karten für PC
- „Stand alone“ Netboxen für bis zu 6 Karten (Digitizer oder AWG)

Firmenausrichtung

Einer der weltweit führenden Hersteller von ultraschnellen und hochauflösenden Digitizern sowie AWG Signal-Generatoren.

Produkte/Linecard

Einzigartiges Konzept aus Basiskarten und Modulen ergibt über 500 verschiedene Produkte! So findet jeder Kunde die exakt passenden Spezifikationen zum fairen Preis und ab Lager lieferbar.

Diensleistungen/Service

Service, Reparatur und Nachproduktion für sämtliche Produkte der letzten 15 Jahre! Support direkt durch die Ingenieure

Standorte/Lager

Großhansdorf bei Hamburg

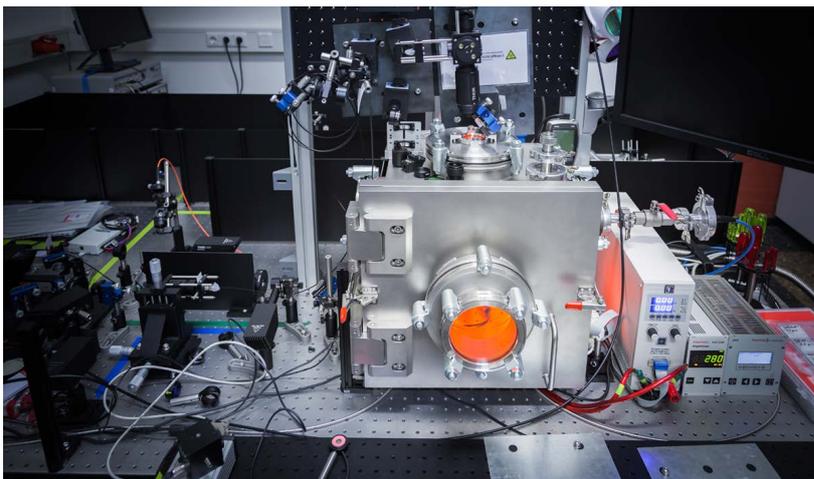


Bild 3. Labornachbau einer industriellen Epitaxie-Anlage zur LED-Fertigung. Mit dem Messaufbau ist die Bestimmung des LED-Emissionsspektrums noch während des Halbleiterwachstums möglich.

(Bild: I. Növermann)

Emissionsspektrum während der Produktion korrigieren

Die In-situ-Hochtemperatur-PL-Emissionsspektren weisen gegenüber der Raumtemperatur-Emission einer fertigen LED eine spektral zu größeren Wellenlängen verschobene Emission auf. Über einen linearen Zusammenhang können die Emissionswellenlängen des fertigen LED-Bauelements jedoch direkt aus dem gemessenen Hochtemperaturspektrum in der Wachstumsanlage bestimmt werden, wodurch sich die Wellenlänge des LED-Bauelements erstmals bereits während des Schichtwachstums bei hohen Prozesstemperaturen präzise einstellen lässt. Im Rahmen der Dissertation konnte die Prognostizierbarkeit der Emissionswellenlänge einer fertigen LED in situ schon ab den ersten aufgewachsenen Halbleiterschichten der aktiven Zone nachgewiesen werden – und dies mit einer Wellenlängengenauigkeit von $\pm 1,3$ nm (2σ).



Dr. Christoph Prall

arbeitet seit 2018 als Entwicklungsingenieur in der Produktentwicklung der smart optics Sensortechnik GmbH in Bochum. Nach dem Abschluss als Diplom-Lasertechniker

2009 schloss er 2011 mit dem Master of Science in Applied Physics an der Hochschule Koblenz ab und war sechs Jahre als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mess- und Sensortechnik der Hochschule Ruhr West, Mülheim a.d. Ruhr tätig. In seiner Doktorarbeit entwickelte er an der Universität Duisburg-Essen ein In-situ-Verfahren zur Messung von LED-Spektren und promovierte 2018 mit Auszeichnung.



Prof. Dr. Daniel Erni

ist seit 2006 Universitätsprofessor und Fachgebietsleiter für für Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik (ATE) an der Universität Duisburg-Essen. Dort gründete

und leitet er den Bachelor- und Master-Studiengang Medizintechnik. Zuvor lehrte er Optoelektronik und optische Kommunikation an der ETH Zürich, wo er 1996 im Bereich Laserphysik promovierte. Er ist Diplom-Ingenieur für Elektrotechnik mit Abschlüssen an der Fachhochschule für Technik Rapperswil und an der ETH Zürich, Autor von über 400 wissenschaftlichen Publikationen und hält mehrere Patente.



<https://doi.org/10.17185/duepublico/46204>



Prof. Dr. Dirk Rüter

wurde 2010 an die Hochschule Ruhr West in Mülheim berufen für die Forschungsgebiete Werkstoffkunde der Elektrotechnik und Bauelemente & Grundschaltungen der Elektro-

nik. Zuvor arbeitete er drei Jahre als Niederlassungsleiter mit Prokura im Produktions- und Entwicklungsbetrieb LumaSense Technologies für berührungslose Temperaturmessung. Er ist Mitgründer der 1997 entstandenen Ingenieurgesellschaft UVC für Entwicklungsdienstleistungen und Prototyping. Dirk Rueter ist Diplom-Ingenieur für Elektrotechnik (TH Karlsruhe) und promovierte in Optoelektronik und Materialsystemen an der TU Hamburg-Harburg.

und somit der elektrischen Leistungsfähigkeit eines elektrischen Bauelementes zusammenhängt, kann somit auch eine In-situ-Qualitätskontrolle eines in der Fertigung befindlichen Bauelements durchgeführt werden. Neben den in der Dissertation betrachteten Halbleitermaterialsystemen wie GaN und InGaN ist eine Übertragung der In-situ-PL-Messtechnik auf weitere Halbleitergruppen denkbar. So konnten bereits in ersten Vorversuchen erfolgreich Hochtemperatur-PL-Messungen an Aluminium-Gallium-Nitrid (AlGaIn)-Halbleitern vorgenommen werden. Auf diesen Halbleiterverbindungen basieren neben UV-Laserdioden oder LEDs auch die neusten Bauarten leistungsstarker und effizienter Hochfrequenztransistoren.

Kooperationspartner aus Forschung und Halbleiterindustrie

Die hier vorgestellte Forschung erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Hochtechnologie-Unternehmen LayTec aus Berlin und mit Unterstützung vom Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) in Berlin sowie in Kooperation mit dem Epitaxie-Anlagenhersteller Aixtron aus Aachen. Es handelt sich um eine kooperative Promotion an der Universität Duisburg-Essen, die an der Hochschule Ruhr West in Mülheim an der Ruhr erstellt wurde. Die Dissertation steht Interessierten über den Online-Publikationsdienst der Universität Duisburg-Essen frei zur Verfügung und kann über den QR-Code abgerufen werden. *mha*