Roland Wuchrer\*, Gerald Gerlach und Thomas Härtling

# Onlinefähige Signalauswertung für spektraloptische Sensoren mit einer Doppelphotodiode

Online-capable signal processing for spectral-optical sensors using a double-layered photodiode

DOI 10.1515/teme-2019-0048

Zusammenfassung: Spektraloptische Sensorik erfasst sowohl physikalische als auch (bio-)chemische Messgrößen auf der Grundlage von definierten spektralen Eigenschaftsänderungen des Messwandlers. In diesem Beitrag wird dafür eine Signalauswertung mit einer Doppelphotodiode (DPD) vorgestellt, die durch ihren Stapelaufbau aus zwei unterschiedlich spektralempfindlichen Photodiodenschichten gleichzeitig spektralselektives Element und Detektor ist. Statt wie bisher die spektrale Information aus einem Spektrum zu extrahieren, wird der Schwerpunkt der spektralen Gesamtverteilung anhand des gemessenen Verhältnisses der beiden wellenlängenabhängigen Photoströme echtzeitfähig ausgewertet. Die Leistungsfähigkeit der DPD wird anhand von Oberflächentemperaturmessungen mit dem Leuchtstoff NaYF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>,Er<sup>3+</sup> demonstriert. Es zeigt sich, dass mit einer Integrator-basierten Auswerteelektronik eine max. Messabweichung der Schwerpunktwellenlänge von 0,1 nm erreicht werden kann. Die onlinefähige Signalverarbeitung und kompakte Baugröße der Doppelphotodiode befördert die vor-Ort-Eignung spektraloptischer Sensoren für die Prozessindustrie, das Umweltmonitoring und viele andere Bereiche.

**Schlüsselwörter:** Gestapelte Photodiode, optoelektronische Abfrageeinheit, spektraloptische Sensoren, anorganische Leuchtstoffe, Thermometrie.

**Abstract:** Spectral-optical sensor technology records physical as well as (bio-)chemical measurands on the basis of specific spectral property changes of the transducer. In this article a signal evaluation with a double-layered photodiode (DPD) is presented, which is a spectrally selective

element and detector at the same time due to its stack structure of two different spectrally sensitive photodiode layers. Instead of extracting the spectral information from a spectrum, the centroid of the overall spectral distribution is evaluated in real time on the basis of the measured ratio of the two wavelength-dependent photocurrents. The performance of the DPD is demonstrated by means of surface temperature measurements with the phosophor NaYF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>,Er<sup>3+</sup>. It is shown that with an integrator-based readout electronics a max. measurement deviation for the centroid wavelength of 0.1 nm can be achieved. In sum, the online-capable signal processing and compact size of the double-layered photodiode foster the on-site applicability of spectral-optical sensors for the process industry, environmental monitoring and many others fields.

**Keywords:** Double-layered photodiode, optoelectronic interrogator, spectral-optical sensors, anorganic phosphors, thermometry.

### 1 Einleitung

Die Steuerung und Regelung vieler Prozesse in der Industrie ebenso wie das Umweltmonitoring erfordern die Echtzeiterfassung von Informationen direkt vor Ort. Hier weisen spektraloptische Sensoren ein großes Einsatzpotenzial auf. Beispiele dafür sind plasmonische Metallnanostrukturen [7] für die Analytik, Faser-Bragg-Sensoren [9] für die Langzeitstrukturüberwachung als auch Leuchtstoffmaterialien [6] für die Thermometrie. Ihre Funktionsweise beruht auf einer von der Messgröße abhängigen spektralen Eigenschaftsänderung in Form einer Wellenlängenverschiebung oder Änderung des Intensitätsverhältnisses zweier Spektrallinien des Messwandlers. Sie bestechen vor allem durch hohe Sensitivität, kompakte Baugröße sowie Einsetzbarkeit unter extremen Umgebungsbedingungen. Die aufwändige Spektrenaufnahme mittels voluminösen Spektrometern oder durchstimmbaren Laser und die sich daraus ergebende komplexe Signalauswertung schränkt

<sup>\*</sup>Korrespondenzautor: Roland Wuchrer, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme, Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden, E-Mail: roland.wuchrer@ikts.fraunhofer.de Thomas Härtling, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme, Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden Gerald Gerlach, Institut für Festkörperelektronik, Technische Universität Dresden, Mommsenstraße 15, 01069 Dresden

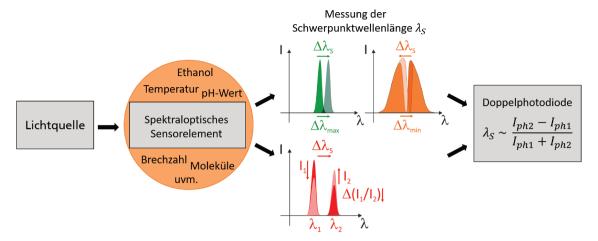


Abb. 1: Funktionsprinzip der Schwerpunktauswertung spektraloptischer Sensorsignale mit einer Doppelphotodiode.

jedoch derzeit ihre industriellen Einsatzmöglichkeiten ein. Dieser Beitrag stellt daher eine neuartige, miniaturisierte optoelektronische Auswerteeinheit vor. Kernelement ist eine Doppelphotodiode (DPD), die durch ihren Stapelaufbau aus zwei unterschiedlich spektralsensitiven Photodiodenschichten gleichzeitig spektralselektives Element und Detektor ist. Neben der Anregungslichtquelle werden keine weiteren optischen Komponenten zur Auswertung benötigt, wodurch kompakte und kosteneffiziente Sensorbaugruppen umsetzbar sind. Das Verhältnis aus den beiden wellenlängenabhängigen Photoströmen der DPD erlaubt hierbei eine intensitätsunabhängige und echtzeitfähige Erfassung der Schwerpunktwellenlänge und damit der gesuchten Messgröße des spektraloptischen Sensors (Abb. 1).

## 2 Doppelphotodiode

#### 2.1 Funktionsweise

Die spektrale Empfindlichkeit einer pn-Photodiode wird bestimmt von ihrem Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  und der Dicke ihres pn-Überganges [1]. Die pn-Schicht verhält sich damit wie ein Bandpassfilter mit einer Zentralwellenlänge  $\lambda_Z$  in Abhängigkeit von der Eindringtiefe. Diese Filtereigenschaft kann genutzt werden, um einen spektralempfindlichen Detektor - eine sogenannte Doppelphotodiode (WS7.56, First Sensor AG) - aus zwei gestapelten, unterschiedlich dicken bzw. spektralempfindlichen Photodiodenschichten gemäß Abb. 2 zu realisieren [2]. Der kurzwellige (blaue) Wellenlängenanteil der auftreffenden Strahlung wird im oberen pn-Übergang absorbiert und in einen Photostrom gewandelt. Die langwellige (nahinfrarote) Strahlung wird aufgrund ihrer höheren Eindringtiefe in

der dickeren Photodiodenschicht absorbiert und in einen zweiten Photostrom umgewandelt. Es werden somit zwei Photoströme generiert, welche zwei unterschiedliche Spektralbereiche repräsentieren. Der Quotient X der beiden Photostromsignale kann dann direkt als Ausgangssignal verwendet werden, das gemäß der Gl. (1) von der Schwerpunktwellenlänge  $\lambda_S$  der einstrahlenden Lichtverteilung abhängt [8]:

$$X = \frac{I_{ph2} - I_{ph1}}{I_{ph1} + I_{ph2}} \sim \lambda_S.$$
 (1)

Durch den gleichen optische Pfad der beiden Photodiodeschichten weist die DPD entscheidende Vorteile auf: Unempfindlichkeiten gegenüber Schwankungen des räumlichen Intensitätsprofils der Beleuchtung sowie Polarisationsdrehungen an Grenzflächen.

#### 2.2 Optoelektronische Auswerteeinheit

Zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit der verwendeten Silizium-Doppelphotodiode WS7.56 wurde eine rauscharme und hochauflösende Auswerteelektronik mit einem zweikanaligen Stromintegrator DDC112 (Texas Instruments) genutzt. Die einstellbare Stromintegration gestattet eine hochdynamische Verstärkung kleinster Photostromänderungen. Die Photoströme  $I_{ph1}$  und  $I_{ph2}$  werden hierbei in 20 Bit-Digitalwerte umgewandelt. Als Anwendungsbeispiel wurde eine kompakte Auswerteeinheit mit einer Baugröße von 7 x 7 x 2,5 cm³ (Abb. 3) für die Messung der temperatursensitiven grünen Lumineszenz des Leuchtstoffes NaYF<sub>4</sub>:Yb³+,Er³+, realisiert. Im Weiteren werden die Ergebnisse dargestellt und der spektrometrischen Auswertung gegenübergestellt.

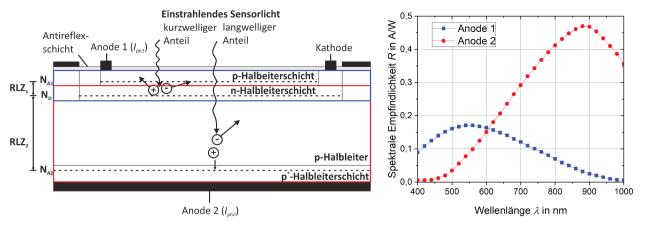


Abb. 2: Aufbau und spektrale Empfindlichkeit der Silizium-Doppelphotodiode WS7.56 (First Sensor AG) [3].



 $\label{eq:Abb.3:DPD-basierende} Abswerteeinheit für Temperaturmessung mit anorganischem Leuchtstoff NaYF_4:Yb^{3+},Er^{3+}.$ 

# 3 Thermometrie mit Leuchtstoff NaYF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>,Er<sup>3+</sup>

Mit dem Aufwärtskonversions-Effekt werden nichtlineare optische Prozesse bezeichnet, bei dem durch die sequentielle Absorption von zwei oder mehr langwelligen Photonen (NIR-Strahlung) über langlebige Energiezustände (mindestens Mikrosekunden) anschließend ein kurzwelliges Photon mit höherer Energie emittiert wird. Der seltenerddotierte Leuchtstoff Natriumyttriumfluorid (NaYF<sub>4</sub>) weist eine sehr hohe Aufwärtskonversions-Effizienz bei Anregung mit einem 980 nm Laser auf [5]. Das Emissionsspektrum von NaYF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>,Er<sup>3+</sup> besitzt mehrere Spektrallinien, davon zwei im grünen Wellenlängenbereich bei 523 nm ( ${}^{2}\mathrm{H}_{11/2}$  $\rightarrow$   $^4\mathrm{I}_{15/2}$  Übergang, G1) und 545 nm ( $^4\mathrm{S}_{3/2}$   $\rightarrow$   $^4\mathrm{I}_{15/2}$ Übergang, G2). Die beiden grünen Energieniveaus sind thermisch miteinander gekoppelt. Durch eine Temperaturzufuhr kommt es aufgrund der thermischen Anregung zu einer Änderung des Populationsverhältnis der beiden Energieniveaus und damit der Emissionsintensitäten  $I_{G1}$ und  $I_{G2}$ . Im thermischen Gleichgewicht kann die anliegende Temperatur T anhand des Intensitätsverhältnisses der beiden grünen Emissionslinien  $V_{G1/G2}$  durch eine Boltzmann-Verteilung beschrieben werden [4]:

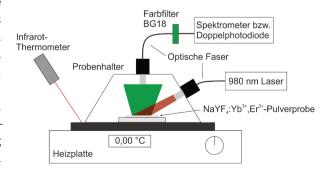
$$V_{G1/G2}(T) = \frac{I_{G1}(T)}{I_{G2}(T)} = B \cdot \exp^{-\frac{\Delta E_{G1/G2}}{k_B T}}.$$
 (2)

 $\Delta E_{G1/G2}$  beschreibt den effektiven Bandabstand zwischen  $^2\mathrm{H}_{11/2}$  und  $^4\mathrm{S}_{3/2},\,k_B$  die Boltzmann-Konstante und B ist eine Konstante. Die absolute Temperatursensitivität  $S_T$  des Intensitätsverhältnisses ergibt sich dann folgendermaßen:

$$S_T = \left| \frac{\partial V_{G1/G2}}{\partial T} \right| = V_{G1/G2} \cdot \frac{\Delta E_{G1/G2}}{k_B T^2}.$$
 (3)

#### 3.1 Messaufbau

Der genutzte Messaufbau (Abb. 4) erlaubt einen stabilen Faserwechsel zwischen Spektrometer und optoelektronischer Auswerteeinheit, so dass die aufgenommenen Emissionsspektren von NaYF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>,Er<sup>3+</sup> und die gemessenen Photostromverhältnisse der DPD miteinander korreliert werden konnten.

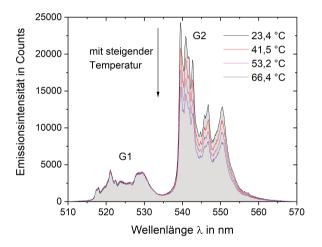


**Abb. 4:** Messaufbau für die temperaturaufgelöste Photolumineszenz-Spektroskopie am Leuchtstoffpulver  $NaYF_4$ : $Yb^{3+}$ , $Er^{3+}$ .

Eine dünne und homogene Schicht des NaYF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>,Er<sup>3+</sup>-Pulvers (Lumilux® SP grün, Honeywell) wurde auf der Heizplatte erwärmt, deren Temperatur mittels eines Punktpyrometers (Marathon MM, Raytek) verifiziert wurde. Über einen fasergekoppelten Probenhalter (RPH-SMA, Thorlabs) wurden die NaYF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>,Er<sup>3+</sup>-Partikel mit einem 980 nm Laser (300 mW) angeregt. Das Emissionslicht wurde mit einer optischen Multimode-Faser gesammelt und anhand eines Spektrometers (iHR 550, Horiba) bzw. mit der Doppelphotodiode analysiert. Für ein störungsfreies Messsignals wurde der spektrale Erfassungsbereich mit einem Bandpass-Farbfilter (BG18, Schott) auf 412 – 569 nm begrenzt.

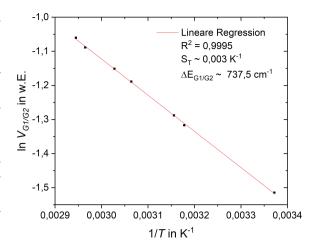
#### 3.2 Temperaturverhalten der grünen Aufwärtskonversion

In Abb. 5 sind die Emissionsspektren der grünen Aufwärtskonversion des NaYF $_4$ :Yb $^3+$ ,Er $^3+$ -Pulvers für den untersuchten Temperaturbereich von 23 °C bis 67 °C dargestellt.



**Abb. 5:** Spektren der grünen Aufwärtskonversion von NaYF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>,Er<sup>3+</sup> bei verschiedenen Temperaturen unter BG18-Farbfilterung. Für die bessere Sichtbarkeit des Temperaturverhaltens wurde nur ein Teil der aufgenommenen Emissionsspektren dargestellt.

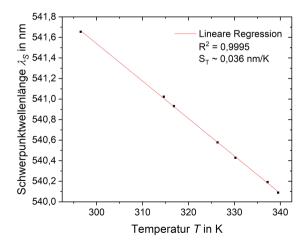
Zur weiteren Beurteilung der temperaturabhängigen grünen Lumineszenz wurde der natürliche Logarithmus des integrierten Intensitätsverhältnisses  $V_{(G1/G2)}$  gegen die reziproke Temperatur (Abb. 6) aufgetragen. Die lineare Ausgleichskurve spiegelt das erwartete Temperaturansprechverhalten gemäß Gl. (2) sehr gut wider. Der aus dem Anstieg ermittelte Bandabstand  $\Delta E_{(G1/G2)}$  von 737,5 cm<sup>-1</sup> sowie die bestimmte Temperatursensitivität von rund 0,003 K<sup>-1</sup> (Gl. (3)) für die NaYF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>,Er<sup>3+</sup>-Partikel entspricht den Werten in der Literatur [4].



**Abb. 6:** Temperaturanalyse des integrierten Intensitätsverhältnisses  $V_{(G1/G2)}$  der Emissionsbanden G1 und G2.

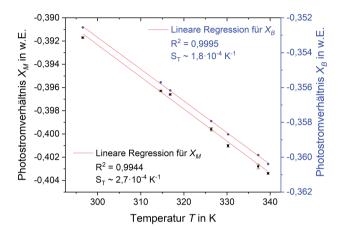
#### 3.3 Erfassung mit Doppelphotodiode

Bei der Doppelphotodiode fließt die gesamte spektrale Intensitätsverteilung der grünen Aufwärtskonversion in das Photostromverhältnis X ein, so dass keine getrennte Betrachtung der beiden Emissionsbanden G1 und G2 wie beim Intensitätsverhältnis  $V_{(G1/G2)}$  stattfindet. Zur Beschreibung des Ansprechverhaltens der DPD wurde zuerst das Temperaturverhalten der Schwerpunktwellenlänge  $\lambda_S$  aus den grünen Emissionsspektren (s. Abb. 5) bestimmt. In Abb. 7 zeigt sich für den betrachteten schmalen Temperaturbereich ein lineares Messverhalten für die Schwerpunktwellenlänge  $\lambda_S$ . Die gegenläufige Verlaufsrichtung im Vergleich zu  $V_{(G1/G2)}$  entspricht der Erwartung, dass sich  $\lambda_S$  mit sinkender Intensität  $I_{G2}$  zu kleineren Wellenlängen verschiebt.



**Abb. 7:** Temperaturverhalten der Schwerpunktwellenlänge  $\lambda_S$  der grünen Aufwärtskonversion, bestimmt aus den Emissionsspektren von Abb. 5.

Die gemessenen Photostromverhältnisse  $X_M$  in Abb. 8 zeigen eine nahezu lineare Temperaturabhängigkeit mit einer Auflösung von 0,01 K sowie einer max. Messabweichung von 3 K. Dies entspricht einer max. Messabweichung der Schwerpunktwellenlänge von rund 0,1 nm. Durch die gute Überdeckung der grünen Emissionsspektren mit dem linearen Bereich der spektralen Empfindlichkeiten der DPD WS7.56 (Abb. 2) spiegelt  $X_M$  gut den Verlauf der Schwerpunktwellenlänge  $\lambda_S$  (Abb. 7) wider. Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass die DPD WS7.56 für die Auswertung der temperatursensitiven grünen Emission von NaYF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>,Er<sup>3+</sup> sehr gut geeignet ist.



**Abb. 8:** Gemessenes Photostromverhältnis  $X_M$  und berechnete Verhältniswerte  $X_B$  (anhand der spektralen Empfindlichkeitswerte, s. Abb. 2) der DPD WS7.56 für die Emissionsspektren der grünen Aufwärtskonversion von NaYF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>,Er<sup>3+</sup> bei verschiedenen Temperaturen (gemäß Abb. 5).

#### 4 Diskussion

Die vorgestellte Signalauswertung spektraloptischer Sensoren mit einer Doppelphotodiode erwies sich in mehrfacher Hinsicht als sehr vorteilhaft. Die Reduktion der Datenerfassung auf ein Photostromverhältnis gestattet eine direkte und damit echtzeitfähige Signalerfassung. Die Abtastrate ist dabei von der zur Verfügung stehenden Signalleistung abhängig und betrug beim verwendeten Stromintegrator DDC112 maximal 2 kHz. Durch die direkte Kopplung von spektraler Auflösung mit der Photostromauflösung der DPD kann eine Steigerung der Detektionsgrenze des spektraloptischen Sensors mittels einer hochauflösenden Verstärkerschaltung erreicht werden. Hier erwies sich der DDC112, der Photostromsänderungen bis in den fA-Bereich auflösen kann, als sehr geeignet. Es konnte damit für die DPD WS7.56 ein Auflösungsvermögen der Schwerpunktwellenlänge von kleiner als 0,1 nm erreicht werden. Neben den genannten Vorteilen führt allerdings die Photostromauswertung auch zu einer begrenzten Einsicht in die tatsächliche Signalform des spektraloptischen Sensors und erfordert daher eine genaue Kenntnis über das individuelle Sensorverhalten.

Zusammenfassend erfüllt die Schwerpunktauswertung mit der DPD schon jetzt viele industrielle Zielanforderungen wie Kosteneffizienz, Miniaturisierung, hohe spektrale Auflösung, Robustheit sowie einfache Handhabung. Darüber hinaus eröffnet der rein optoelektronische Aufbau der DPD den Einsatz von Fertigungstechnologien der Mikrosystemtechnik und -elektronik, womit perspektivisch die Umsetzung integrierter bzw. intelligenter spektraloptischer Sensorbaugruppen möglich wäre.

Danksagung: Die Autoren danken Hendrik Funke, Peter Blüthgen und Tobias Stüwe vom Fraunhofer IKTS für die Arbeit an der Auswerteelektronik und Messsoftware. Die vorgestellten Arbeiten wurden durch das FhG-interne Programm mit dem Förderkennzeichen 692271 finanziert.

#### Literatur

- W. Bludau. Halbleiter-Optoelektronik: Die physikalischen Grundlagen der LED's, Diodenlaser und pn-Photodioden. Hanser, 1995.
- [2] S. Feruglio, G.-N. Lu, P. Garda und G. Vasilescu. A Review of the CMOS Buried Double Junction (BDJ) Photodetector and its Applications. Sensors, 8(10):6566–6594, 2008.
- [3] First Sensor AG. Wavelength-sensitive diode WS7.56-TO5i, 2015. URL https://www.first-sensor.com/en/products/opticalsensors/detectors/wavelength-sensitive-diodes-ws/index. html/.
- [4] R. G. Geitenbeek, P. T. Prins, W. Albrecht, A. van Blaaderen, B. M. Weckhuysen und A. Meijerink. NaYF<sub>4</sub>:Er<sup>3+</sup>,Yb<sup>3+</sup>/SiO<sub>2</sub> Core/Shell Upconverting Nanocrystals for Luminescence Thermometry up to 900 K. The journal of physical chemistry. C. Nanomaterials and interfaces, 121(6):3503–3510, 2017.
- [5] M. Haase und H. Schäfer. Nanopartikel für die Aufwärtskonversion. Angewandte Chemie, 123(26):5928–5950, 2011.
- [6] A. H. Khalid und K. Kontis. Thermographic Phosphors for High Temperature Measurements: Principles, Current State of the Art and Recent Applications. Sensors, 8(9):5673–5744, 2008.
- [7] N. Steinke, S. Döring, R. Wuchrer, C. Kroh, G. Gerlach und T. Härtling. Plasmonic sensor for on-site detection of diclofenac molecules. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 288:594 – 600, 2019.
- [8] R. Wuchrer, S. Amrehn, L. Liu, T. Wagner und T. Härtling. A compact readout platform for spectral-optical sensors. *Journal* of Sensors and Sensor Systems, 5(1):157–163, 2016.
- [9] X. W. Ye, Y. H. Su und J. P. Han. Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Using Optical Fiber Sensing Technology: A Comprehensive Review. *The Scientific World Journal*, 2014(1):1–11, 2014.