


Metamaterial-Based Mid-Infrared Gas Sensing

Doctoral Thesis**Author(s):**

[Lochbaum, Alexander](#) 

Publication date:

2020-02-17

Permanent link:

<https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000431783>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Originally published in:

ETH Zürich Series in Electromagnetic Fields 15

DISS. ETH NO. 26637

***METAMATERIAL-BASED
MID-INFRARED GAS SENSING***

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

ALEXANDER LOCHBAUM

M. Sc. Electrical Engineering and Information Technology
Karlsruhe Institute of Technology

born on 20.07.1987

citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Juerg Leuthold, examiner
Prof. Dr. Hatice Altug, co-examiner
Dr. Lukas Bürgi, co-examiner

2020

Abstract

In recent years, air pollution finally has been recognized as a global, pressing issue [1-3]. The resulting increase in environmental awareness leads to a tremendous rise in demand for low-cost CO₂ sensors, which are key components of air quality monitoring [2] and "smart home" [4] applications. In order to access these high-volume, price-sensitive markets, technologies that offer low cost (<\$10), sensitive (<50 ppm) and compact (mm-sized) CO₂ detection are required.

Among the large number of different gas sensing schemes, optical absorption sensors are known for their high selectivity, fast response time, and long-term stability [5]. Furthermore, for certain gases such as CO₂, optical absorption sensing is the only reliable detection method currently available [5]. Within the field of optical gas sensors, non-dispersive infrared (NDIR) sensing at mid-infrared (mid-IR) wavelengths is a compact and relatively low-cost measurement principle. Owing to its simplicity, it is one of the commercially most relevant optical gas sensing schemes to date [5-7]. Commercial NDIR CO₂ sensors offer sensitivities on the order of 30 ppm in centimeter-scaled systems at prices around \$50 - \$100 [8-10]. In order to prevail in above-mentioned markets, mid-IR gas sensors must substantially scale down in both size and cost without compromising performance. Unfortunately, the simple scaling of NDIR sensors by sheer size reduction approaches an intrinsic limitation resulting from their use of discrete sensor components and dielectric interference filters.

In this thesis, an all-metamaterial optical gas sensing concept has been developed that overcomes the integration limit of conventional NDIR sensors. Key to its design are metamaterial perfect absorbers (MPAs), which serve as optical filter elements that are integrated into the membranes of on-chip thermal emitters and detectors. Combining MPAs on the emitter and the detector side cascades their individual filter functions, yielding a combined narrowband resonance that is matched to the absorption band of the target gas, in this case CO₂. The MPAs' angle-independent filter characteristics allow for a non-resonant cavity design that "folds" the required cm-long absorption path into a mm-sized cuboid cavity, thereby reducing the absorption volume by a factor of 30 when compared to conventional cavity designs. The all-metamaterial gas sensor exhibits a decrease in energy consumption by 80% when compared to commercial solutions without compromising performance (CO₂ sensitivity 22 ppm,

Abstract

humidity cross sensitivity 1.2 ppm/%rH). The sensor architecture developed in this thesis offers a viable path toward compact and low-cost mid-infrared gas sensors without trade-offs in sensitivity or robustness.

This cumulative dissertation is structured as follows:

Chapter 1 serves as an introduction to this thesis. After motivating the research, it provides an overview on the state of the art in non-dispersive optical gas sensing. The chapter concludes with the vision of an all-metamaterial optical gas sensor.

Chapter 2 summarizes the theoretical backgrounds relevant to the interdisciplinary field of metamaterial optical gas sensing. First, an introduction to absorption spectroscopy and non-dispersive infrared gas sensing is given. The principles of thermal emission and detection are established, followed by an overview on electromagnetics, plasmonics, and the concept of metamaterials. The chapter concludes with an introduction to the theory of integrating spheres.

Chapter 3 demonstrates an on-chip thermal light source exhibiting narrowband and efficient mid-infrared emission. The light source's spectral properties are tailored by metamaterial perfect absorbers, which are integrated into the emitter membrane. Employed in a gas sensing setup, the metamaterial light source leads to a 5-fold increase in relative sensitivity when compared to a conventional blackbody emitter.

Chapter 4 presents a CMOS-compatible metamaterial thermal detector with a narrowband absorption resonance at 4.29 μm . The high selectivity of the device leads to a 6.5-fold reduction in humidity cross sensitivity when employed in a gas sensing setup. The metamaterial's potential for highest integration densities is showcased by the realization of a dual-band detector on a single thermopile membrane.

Chapter 5 demonstrates for the first time an all-metamaterial optical CO₂ sensor. By advantageously combining metamaterial thermal emitters and detectors with an efficient non-resonant cavity, the sensor's absorption volume could be decreased by a factor of 30 when compared to conventional non-dispersive infrared gas sensors. The all-metamaterial sensor performs at par with much larger commercial devices, while consuming 80% less energy per measurement.

Chapter 6 summarizes the findings of this thesis and gives an outlook on future research.

Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren wurde Luftverschmutzung endlich als globales, dringendes Problem erkannt [1-3]. Das erhöhte Umweltbewusstsein führt zu einer stark ansteigenden Nachfrage nach günstigen CO₂ Sensoren für Luftqualitätsüberwachung [2] und "smart home" [4] Anwendungen. Hierfür werden kostengünstige (<\$10), sensitive (<50 ppm) und kompakte (mm-Abmessungen) CO₂ Sensoren benötigt.

Innerhalb der Vielzahl verschiedener Gasdetektionsmechanismen sind optische Absorptionssensoren für ihre Selektivität, schnelle Ansprechzeit, und Langzeitstabilität bekannt [5]. Hinzu kommt, dass für manche Gase, zum Beispiel CO₂, die optische Gassensorik derzeit die einzig verlässliche Detektionsmethode ist [5]. Innerhalb der optischen Gassensoren ist die nicht-dispersive Infrarot (NDIR) Methode bei Wellenlängen im mittleren Infrarot (mid-IR) ein kompaktes und kostengünstiges Messprinzip. Aufgrund ihres einfachen Aufbaus zählt sie zu den kommerziell erfolgreichsten Detektionsmethoden [5-7]. Kommerzielle NDIR CO₂ Sensoren weisen Sensitivitäten von ca. 30 ppm auf, haben Abmessungen im cm-Bereich, und kosten zwischen \$50 und \$100 [8-10]. Zukünftig müssen sowohl die Grösse als auch der Preis von mid-IR Gassensoren deutlich reduziert werden, wenn sich diese in den obigen Anwendungen behaupten sollen. Leider ist die Grössenreduktion derzeitiger NDIR Sensoren fundamental begrenzt, was primär aus deren Nutzung diskreter Sensorkomponenten und dielektrischen Interferenzfiltern resultiert.

In dieser Dissertation wurde ein metamaterial-basiertes, optisches Gasmesskonzept entwickelt, welches das Integrationslimit herkömmlicher NDIR Sensoren überwindet. Zentraler Bestandteil dieses Konzepts sind perfekte Metamaterialabsorber (MPAs), welche in die Emitter- und Detektormembrane integriert werden, und als optische Filterelemente dienen. Die Kaskadierung von MPAs auf Emitter- und Detektor ermöglicht eine kombinierte schmalbandigen Resonanz, welche auf das Absorptionsband des zu messenden Gases (hier CO₂) abgestimmt ist. Die winkelunabhängigen Filtereigenschaften von MPAs ermöglichen den Einsatz einer nicht-resonanten Kavität, welche die erforderliche Pfadlänge im cm-Bereich in einen mm-grossen Quader "faltet". Dies reduziert das Absorptionsvolumen im Vergleich zu herkömmlichen CO₂ Sensoren um einen Faktor 30. Im Vergleich zu kommerziellen Lösungen weist der metamaterial-basierte Gassensor eine Reduktion des Energieverbrauchs um

Zusammenfassung

80% bei konstanter Leistung (CO_2 Sensitivität 22 ppm, Feuchte-Kreuzsensitivität 1.2 ppm/%rH) auf. Die in dieser Arbeit entwickelte Sensorarchitektur ermöglicht kompakte, kostengünstige mid-infrarote Gassensoren ohne Einbußen von Sensitivität oder Robustheit.

Diese kumulative Dissertation ist wie folgt gegliedert:

Kapitel 1 dient als Einleitung in diese Arbeit. Neben der Motivation des Forschungsthemas gibt es einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik im Gebiet der nicht-dispersiven Gassensoren. Das Kapitel schliesst mit der Vision eines metamaterial-basierten, optischen Gassensors.

Kapitel 2 fasst die relevanten theoretischen Grundlagen dieser Dissertation zusammen. Eingangs wird eine Einführung in Absorptionsspektroskopie und in die nicht-dispersive Gassensorik gegeben. Anschliessend werden die Grundlagen der thermischen Emission und Detektion vorgestellt, gefolgt von einem Überblick über Elektromagnetismus, Plasmonik und der Theorie der Ulbricht-Kugeln.

Kapitel 3 stellt eine chip-basierte Metamaterial-Lichtquelle vor, welche schmalbandige und effiziente thermische Emission im mittleren Infrarotbereich aufweist. In einem Gasetektionsexperiment eingesetzt führt die Lichtquelle zu einer 5-fachen Erhöhung der relativen Sensitivität im Vergleich zu einem herkömmlichen Schwarzkörperstrahler.

Kapitel 4 stellt einen CMOS-kompatiblen, metamaterial-basierten, thermischen Detektor mit einer schmalbandigen Absorptionsresonanz bei $4.29 \mu\text{m}$ vor. Eingesetzt in einem Gasetektionsexperiment führt die hohe Selektivität des Bauteils zu einer Reduktion der Feuchte-Kreuzsensitivität um einen Faktor 6.5. Die hohe Integrationsdichte des Metamaterials wird durch die Realisierung eines Zweikanal-Detektors auf einer einzigen Detektor-Membrane demonstriert.

Kapitel 5 demonstriert einen rein metamaterial-basierten optischen CO_2 -Sensor. Durch die geschickte Kombination metamaterial-basierter Emittter und Detektoren mit einer nicht-resonanten Kavität kann das Absorptionsvolumen des Sensors um einen Faktor 30 im Vergleich zu herkömmlichen NDIR Sensoren verkleinert werden. Der metamaterial-basierte Gassensor weist vergleichbare Leistungskennwerte wie viel grössere, kommerzielle Sensoren auf, bei einer gleichzeitigen Reduktion des Energieverbrauchs um 80%.

Kapitel 6 fasst die Ergebnisse dieser Dissertation zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsthemen.