



Doctoral Thesis

## **Micromirrors for integrated tunable mid-infrared detectors and emitters**

**Author(s):**

Quack, Niels

**Publication Date:**

2009

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005994709> →

**Rights / License:**

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

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISSERTATION ETH No. 18702

**MICROMIRRORS FOR INTEGRATED TUNABLE  
MID-INFRARED DETECTORS AND EMITTERS**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

NIELS QUACK

Dipl. Microtechn. EPF Lausanne

25 July 1980

citizen of Fällanden (Zürich)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J. Dual, examiner  
Prof. Dr. Nico de Rooij, co-examiner  
PD Dr. Hans Zogg, co-examiner  
Dr. Stefan Blunier, co-examiner

Zürich, 2009

## **ABSTRACT**

The mid-infrared range is of interest in spectroscopic applications, due to the large number of organic compounds that exhibit characteristic absorption bands in this spectral region. Semiconductor technology, however, has been developed mainly for the near-infrared, for applications in telecom, as well as in the far-infrared, mostly driven by the interest in thermographic applications.

In this thesis, micromirrors for novel integrated narrow-band tunable mid-infrared detectors and emitters are presented. Both such detectors and emitters can be fabricated by placing an active layer inside a resonant microcavity, which consists of two reflectors facing each other. Both narrowband mid-infrared sensors and lasers can be fabricated using epitaxial growth of lead-chalcogenides on silicon substrates. With the same materials, high reflectivity distributed Bragg reflectors can be fabricated, which can be used as resonant cavity mirrors. The resonance wavelength for sensors and for lasers depends on the cavity length. Length and finesse of the resonant cavity determine the resonance wavelength and the detection (emission)

linewidth. One possibility to make the sensor or the laser tunable over a certain wavelength region is to vary the cavity length. This can be achieved through a mechanically moving micromirror at one end of the resonant cavity.

The challenges for such mechanically moving micromirrors lie in the fabrication of high quality reflective surfaces with a movement perpendicular to the wafer surface in the range of the detection wavelength, i.e. of some micrometers for the mid-infrared. The suspensions have to be designed sufficiently soft for obtaining reasonably low actuation voltages for the required displacements, but sufficiently stiff in order to retain adequate mechanical stability. Reflectivity, curvature and parallelism of the movable micromirrors in the resonant cavity have to be controlled in order to adapt the resonant cavity layout and finesse to the needs of the relevant application.

Within the scope of this thesis, two variants of micromirrors for integrated tunable detectors and emitters have been investigated, including design, process development and fabrication. The micromirrors were fabricated in the device layer of a Silicon-On-Insulator wafer using Deep Reactive Ion Etching and standard microfabrication technology. Using these fabrication methods, very compact integrated systems can be manufactured. Both micromirror variants are equally suited for implementation in tunable detectors and tunable emitters. In both variants, the displacement vertical to the wafer surface is obtained by electrostatic actuation, on the one hand with actuation electrodes in a parallel plate configuration, and on the other hand with comb drive actuators.

The layout includes the design of the micromirror, the configuration of the suspension beams and the electrostatic actuator design in order to obtain the desired displacements. The typical micromirror square length is between 300  $\mu\text{m}$  and 600  $\mu\text{m}$ , thickness 10  $\mu\text{m}$ , and the suspensions are accommodated in a square frame with a typical length ranging from 0.8 mm to 1.5 mm. However, there remains room for further minimizing the footprint.

The micromirrors fabricated in this work showed displacements around 3  $\mu\text{m}$  at 30 V actuation voltage, depending on the geometry. High mirror reflectivity was achieved by a 60 nm thin gold coating. The micromirrors' radii of curvature have been adjusted precisely in the range of centimeters by applying an additional chrome thin film on the mirror, and separated actuation electrodes allowed tilting of the micromirrors in order to achieve a parallel alignment inside the resonant cavity. The mechanical resonance frequencies occur above a few kHz and may be adjusted by the design of the mirror geometry and the suspensions. At atmospheric pressure, the mechanical resonances are strongly degraded by squeeze-film air damping, reducing

Q-factors typically below 100. At low pressures, below 1  $\mu\text{bar}$ , Q-factors increase typically over 3'000.

In collaboration with the Thin Film Physics group at ETH Zürich, fabricated micromirrors of both types have been joined successfully with photodiodes to form tunable resonance cavity enhanced detectors. During assembly, temperatures are kept below 110°C in order to avoid diffusion processes which could deteriorate the device performance.

The use of the micromirrors allowed the realization of very compact tunable detector systems in the mid-infrared. These are the first tunable resonant cavity enhanced detectors in the mid-infrared that have been presented to date. Using parallel plate actuated micromirrors, detectors with a single mode tuning range from 4.85  $\mu\text{m}$  to 5.15  $\mu\text{m}$  have been presented, and using comb drive actuated micromirrors, a wide wavelength tuning range from 4.7  $\mu\text{m}$  to 5.4  $\mu\text{m}$  has been achieved.

The detector performance was limited by the broadened linewidth due to finesse degradation, among others influenced by reflectivity, curvature and departure from parallelism. The detector linewidth was about 0.1  $\mu\text{m}$ . A narrower linewidth can be obtained with a higher initial cavity length, thus a higher operating resonance mode, however, to the cost of a reduced free spectral range, i.e. a reduced tuning range. Alternatively, linewidth reduction can be achieved by increasing the cavity finesse which can be obtained by fabrication process improvements.

Finally, a spectroscopic application has successfully been demonstrated using a tunable mid-infrared resonant cavity enhanced detector, which was used to detect carbon monoxide in a 5 cm long gas cell filled with a carbon monoxide partial pressure of 250 mbar. In a further step, implementation of the micromirrors in vertical external cavity surface emitting lasers is envisioned. The developed micromirrors are suitable for these applications without modification in the fabrication process; the expected narrow emission linewidth of a few nanometers make them among others potentially interesting for spectroscopic applications.

## ZUSAMMENFASSUNG

Der mittlere Infrarotbereich ist von Interesse in spektroskopischen Anwendungen aufgrund des Vorkommens spezifischer Absorptionsbanden zahlreicher organischer Verbindungen. Die Halbleitertechnologie hat sich jedoch hauptsächlich im nahen Infrarotbereich entwickelt, aufgrund der Anwendungen im Telekommunikationsbereich, sowie im fernen Infrarot, vornehmlich für thermographische Anwendungen.

In der vorliegenden Dissertation werden Mikrospiegel für neuartige, schmalbandige durchstimmbare Sensoren und Laser vorgestellt. Sowohl bei solchen Sensoren als auch bei Lasern wird ein aktives Element in einem Resonator, bestehend aus zwei gegenüberliegenden Reflektoren, platziert. Solche schmalbandige Sensoren und Laser im mittleren Infrarotbereich können durch Epitaxie von Bleichalkogeniden auf Silizium-Substraten hergestellt werden. Dieselben Materialien eignen sich ebenso zur Herstellung von Bragg-Reflektoren, welche für die Resonatorspiegel verwendet werden können. Sowohl bei resonanzverstärkten Sensoren als auch bei Lasern hängt

die Wellenlänge von der Länge des Resonators ab. Länge und Güte des Resonators bestimmen Detektions-, resp. Emissions-, -wellenlänge und -linienbreite. Um Sensoren oder Laser über einen gewissen Spektralbereich durchstimmbare zu gestalten, kann die Länge des Resonators variiert werden. Dies kann durch einen mikromechanisch verschiebbaren Mikrospiegel erreicht werden.

Die Herausforderungen bei der Auslegung eines solchen mikromechanisch verschiebbaren Mikrospiegels liegen in der Herstellung von ebenen Oberflächen mit hoher Reflektivität welche über einen Bereich von mehreren Mikrometern senkrecht zur Waferenebene bewegt werden können. Die Aufhängungen eines solchen Mikrospiegels müssen hierfür genügend weich gestaltet werden um die elektrische Aktuationsspannung in einem vernünftigen Bereich zu halten, aber dennoch genügend steif um mechanische Stabilität zu gewährleisten. Reflektivität, Krümmung und eine parallele Ausrichtung des Mikrospiegels im Resonator müssen kontrolliert werden. Damit kann, je nach Anwendung, die Güte und Form des Resonators angepasst werden.

Im Rahmen dieser Dissertation wurden zwei Varianten von Mikrospiegeln untersucht. Prozessentwicklung und Herstellung erfolgten mittels Tiefenätzen und mikrotechnischer Standardfabrikationsmethoden in Silizium, was die Herstellung äusserst kompakter Systeme erlaubte. Beide Mikrospiegelvarianten eignen sich sowohl für einen Einsatz in durchstimmbaren Detektoren als auch in durchstimmbaren Emittieren. Bei beiden Varianten wird die notwendige Verschiebung des Mikrospiegels mittels elektrostatischer Anregung erreicht. Im ersten Fall sind die Elektroden als Plattenkondensator angeordnet, im zweiten Fall sind die Elektroden als comb-drives realisiert.

Die Auslegung umfasste die Gestaltung des Mikrospiegels, die geometrische Anordnung der Aufhängungen und die elektrostatischen Aktoren um die gewünschte Verschiebung zu erreichen. Die quadratischen Mikrospiegel haben typischerweise eine Seitenlänge von 300  $\mu\text{m}$  bis 600  $\mu\text{m}$ , eine Dicke von 10  $\mu\text{m}$ , und die Aufhängungen sind in einer quadratischen Aussparung mit einer Seitenlänge von typischerweise 0.8 mm bis 1.5 mm angeordnet. Eine weitere Reduktion dieser Grundfläche ist jedoch möglich.

Bei einer Anregungsspannung um 30 V konnten die hergestellten Mikrospiegel um ca. 3  $\mu\text{m}$  verschoben werden. Hohe Reflektivität wurde mittels einer 60 nm dünnen Goldbeschichtung erreicht. Krümmungsradien im Bereich von Zentimetern konnten durch Auftragen einer zusätzlichen dünnen Chromschicht gezielt eingestellt werden. Mehrere getrennte Aktuationselektroden erlauben das Verkippen der Mikrospiegel wodurch eine parallele Ausrichtung innerhalb des Mikroresonators

ermöglicht werden kann. Die mechanischen Resonanzfrequenzen liegen im Bereich von mehreren kHz und können mit der Anordnung und Geometrie der Aufhängung eingestellt werden. Bei atmosphärischem Umgebungsdruck wurden Q-Faktoren typischerweise unter 100 gemessen. Insbesondere die Luft zwischen den Kondensatorplatten dämpft hierbei die mechanischen Resonanzen. Bei einem Druck unter 1  $\mu$ bar konnten entsprechend höhere Q-Faktoren, typischerweise mehr als 3'000 gemessen werden.

In Zusammenarbeit mit der Dünnschichtphysikgruppe der ETH Zürich wurden hergestellte Mikrospiegel erfolgreich mit Infrarotsensoren zu durchstimmbaren Detektoren verbunden. Beim Zusammenfügen wurde insbesondere darauf geachtet, dass die Prozesstemperaturen 110°C nicht überschreiten, um Diffusionsprozesse zu unterbinden, welche zu Performanceeinbussen führen könnten.

Mit den hergestellten Mikrospiegeln konnten äusserst kompakte, durchstimbare Detektorsysteme realisiert werden. Dies ist der erste Bericht über durchstimbare resonanzverstärkte Detektoren im mittleren Infrarotbereich. Bei einer Detektorversion basierend auf der Plattenkondensatorvariante konnte die Detektionswellenlänge eines einzelnen Mode über einen Bereich von 4.85  $\mu$ m bis 5.15  $\mu$ m vorschoben werden, mittels eines comb-drive Aktuators konnte ein Wellenlängenbereich von 4.7  $\mu$ m bis 5.4  $\mu$ m abgedeckt werden.

Die Detektorperformance wurde durch eine relativ breite Linienbreite beschränkt, welche durch eine verminderte Güte der Kavität hervorgerufen wurde, unter anderem bedingt durch Einflüsse von Reflektivität, Krümmung und Parallelität. Die gemessene Linienbreite betrug ungefähr 0.1  $\mu$ m. Zum einen kann eine schmalere Linienbreite mit einer grösseren Resonatorlänge erreicht werden, d.h. wenn der Detektor in einem höheren Mode betrieben wird. Dies geht jedoch zu Lasten der freien Weglänge und beschränkt somit den durchstimbaren Wellenlängenbereich. Eine weitere Strategie für eine verbesserte Linienbreite besteht in der Erhöhung der Güte des Resonators, was unter anderem durch Optimierungen im Herstellungsprozess erreicht werden kann.

Durch den Nachweis von Kohlenmonoxid in einer bei 250 mbar Partialdruck gefüllten Gaszelle von 5 cm Länge mittels eines solchen Detektors konnte schliesslich eine spektroskopische Anwendung erfolgreich demonstriert werden. In einem weiteren Schritt ist eine Verwendung der Mikrospiegel, ohne weitere Anpassung im Herstellungsprozess, für durchstimbare Laser vorgesehen. Bei einem solchen durchstimbaren Laser sind Linienbreiten im Bereich von wenigen Nanometern zu erwarten, womit diese zu möglichen Kandidaten für spektroskopische Anwendungen mit höherer Auflösung werden.