

Ein mikromechanisches, durchstimmbares Fabry-Perot-Filter für die Nichtdispersive Gasanalytik im Spektralbereich (3...5) μm

Norbert Neumann¹, Matthias. Heinze¹, Hans-Jürgen Stegbauer¹, Karla Hiller², Steffen Kurth³

¹ InfraTec GmbH Dresden, Gostritzer Str. 61-63, 01217 Dresden

² TU Chemnitz, Zentrum für Mikrotechnologien, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz

³ Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Außenstelle Chemnitz, Reichenhainer Str. 88, 09126 Chemnitz

Zusammenfassung

Grundlage des durchstimmbaren Infrarotfilters ist eine klassische Fabry-Perot-Anordnung, die aus zwei planparallelen Spiegeln und einem Luftspalt-Resonator gebildet wird. Als Spiegel wurden Bragg-Reflektoren gewählt, die aus hoch- und niedrigbrechenden, dielektrischen $\lambda/4$ -Schichten bestehen. Das Filter ist in Volumen-Mikromechanik aus doppelseitig polierten, 300 μm dicken Si-Wafern gefertigt. Dadurch wird eine minimale Rauheit und Verwölbung der Spiegel garantiert. Der bewegliche Spiegelträger besteht aus zwei Wafern, um ein Festkörpergelenk aus zwei parallelen Federn zu bilden. Elektrostatische Antriebe zwischen dem mittleren, beweglichen Spiegelträger und einem oberen und einem unteren Wafer lenken den beweglichen Spiegel aus seiner Ruhelage aus und vergrößern bzw. verkleinern den Luftspalt. Durchstimmbare Filter für den Bereich von (3,9...3,0) μm mit einer spektralen Bandbreite von (50...60) nm wurden erfolgreich getestet.

Einführung

Ein Großteil der Entwicklungen der letzten Jahre zielten auf Anwendungen in der optischen Nachrichtenübertragung und der Gasanalyse im nahen Infrarot (IR). Beispielsweise wird in [1, 2] durch Verwendung von freitragenden InP-Luft basierten Bragg-Reflektoren ein durchstimmbares Filter für etwa 1,5 μm beschrieben. In [3] wird ein Fabry-Perot-Interferometer (FPI) für den sichtbaren Spektralbereich verwendet, welches mit Silber-beschichteten Si_3N_4 -Membranen als Spiegel arbeitet und hohe Reflektivität mit geringer spektraler Bandbreite verbindet. Jedoch ist die Filter-Transmission wegen der Absorptionsverluste in den Ag-Schichten [4] auf 20 % beschränkt. Fabry-Perot-Interferometer mit dielektrischen Spiegeln für die Infrarot-Spektroskopie werden in [5, 6] vorgeschlagen. Als Antrieb für die Spiegelauslenkung wurden in [6] ein Piezoelemente verwendet. Die Realisierung in Oberflächen-Mikromechanik in [5] führt zu hoher Verwölbung der Spiegel bei der Abstimmung des Filters, die sich in einer vergrößerten spektralen Bandbreite niederschlägt.

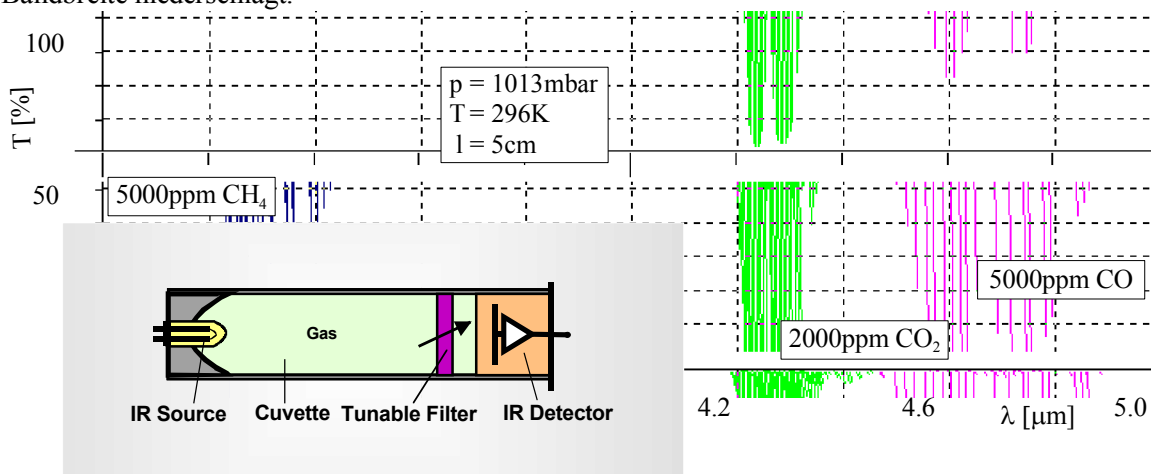


Bild 1 IR-Absorptions-Spektren und Konfiguration eines Gasmonitors mit durchstimmbarem Filter

In **Bild 1** ist eine einfache Konfiguration eines Nicht-Dispersiven Infrarot (NDIR)-Gasmonitors unter Verwendung eines durchstimmbaren Filters dargestellt. Üblicherweise wird die Absorption eines Gases, z. B. im mittleren Infrarotbereich von (3...5) μm mittels eines Schmalbandfilters gemessen, das auf die Absorption des Messgases abgestimmt ist. Ausgerüstet mit einem durchstimmbaren Filter arbeitet der Gasanalysator wie ein Spektrometer. Flexibilität und Performance eines solchen Gerätes sind wesentlich besser als ein einfacher Monitor, besonders wenn Gasmischungen analysiert werden müssen.

Gesamt-Konzept

Schlüsselement des durchstimmbaren IR-Filters ist ein klassisches Fabry-Perot-Interferometer, das aus einem von zwei planparallelen Spiegeln gebildeten Resonator für Interferenzen 1. Ordnung besteht. Als Spiegel wurden Bragg-Reflektoren mit sehr niedriger Eigenabsorption verwendet. Die Transmission eines in **Bild 2** schematisch dargestellten Fabry-Perot-Interferometers wird durch die Airy-Funktion beschrieben:

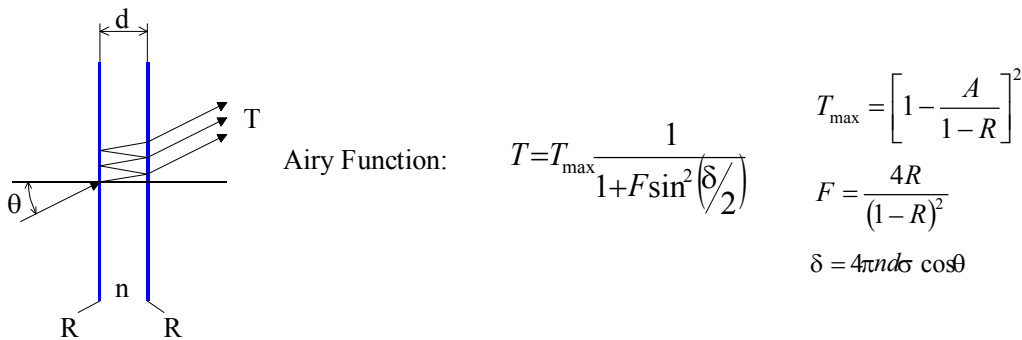


Bild 2 Planparallele Spiegelanordnung eines FPI und mathematische Beschreibung der Transmission

Das Durchstimmen des Filters wird durch Ändern des physikalischen Abstands zwischen einem festen und einem beweglichen Spiegel durch elektrostatische Antriebe erreicht. In **Bild 3** sind die wesentlichen Kennwerte eines FPI beschrieben, welche man aus der Airy-Funktion ableiten kann. Bei einem FPI 1. Ordnung mit Luft als Resonatormedium, lotrechtem Einfall ($n=m=\cos\theta=1$) und Vernachlässigung der Dispersion der Phasenverschiebung bei der Reflexion an dielektrischen Schichten hängen sowohl die Zentralwellenlänge (ZWL) λ_1 bzw. Zentralwellenzahl σ_1 als auch der Freie Spektralbereich FSR nur von der Dicke des Luftspaltes ab, während die spektrale Halbwertsbreite FWHM zusätzlich vom Reflektionsgrad R der Spiegel bestimmt wird. Der Freie Spektralbereich begrenzt den maximalen Durchstimmbereich und die Finesse beschreibt die Güte eines FPI.

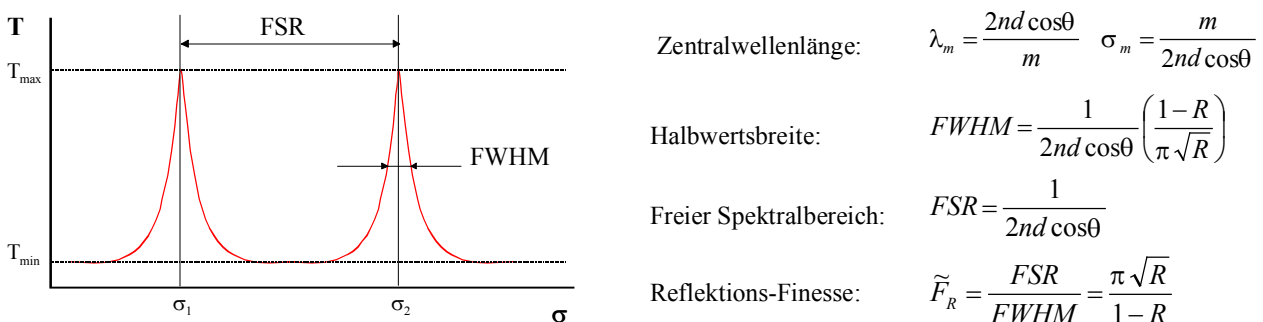


Bild 3 Transmission und Kennwerte eines FPI

Das Filter ist in Volumen-Mikromechanik gefertigt. Undotierte, doppelseitig polierte Si-Wafer werden als Spiegelträger benutzt. Der bewegliche Spiegel besteht aus Ebene 2 und Ebene 3, um eine Parallelfederanordnung zu bilden. Wird eine negative Vorspannung an die Elektroden auf Ebene 4 und eine positive Vorspannung an die Elektroden auf Ebene 1 gelegt, so kann der bewegliche Spiegel durch eine Spannung im Bereich zwischen der positiven und negativen Vorspannung ausgelenkt werden. Ein Querschnitt des Filters ist in **Bild 4** dargestellt.

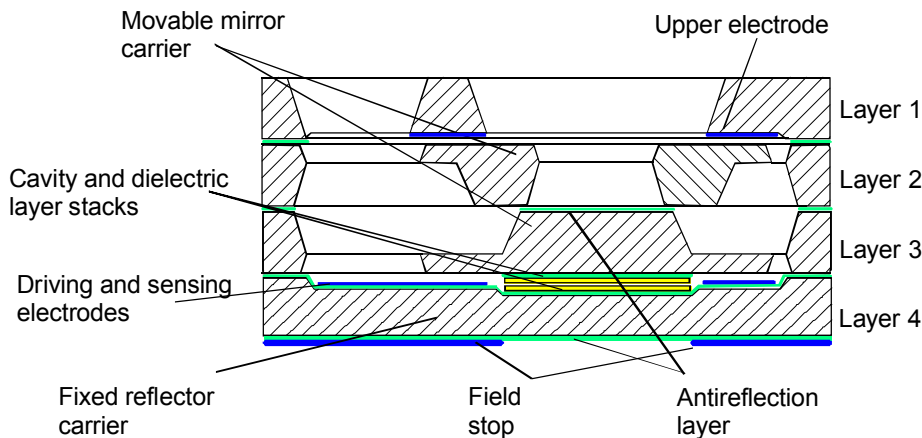


Bild 4 Querschnitt des durchstimmbaren Filters

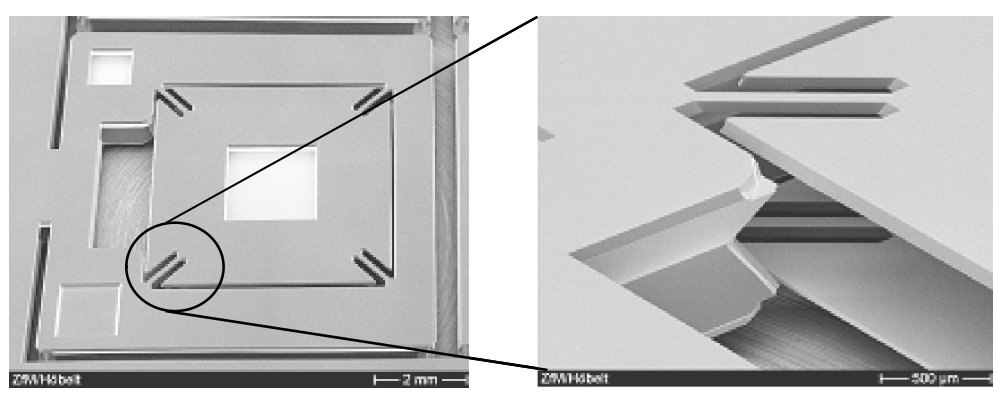


Bild 5 REM-Aufnahme des Filters und Detail der parallelen Federaufhängung

Der Spiegel des Filters misst $(2,2 \times 2,2) \text{ mm}^2$ und ist umgeben von den Antriebselektroden, den diagonalen Biegefedern und einem Montagerand. Die Parallel-Federaufhängung ist in **Bild 5** im Detail dargestellt. Durch diese Federaufhängung, die wie ein Festkörpergelenk wirkt, wird die Spiegelverkipfung beim Durchstimmen weitgehend minimiert.

Optik-Konzept

Für die Bragg-Reflektoren wurde ein unsymmetrisches Design $n_s |LH|^p n_0$, $p=2, 3$ aus alternierenden niedrig- und hochbrechenden $\lambda/4$ -Schichten gewählt. Die niedrig- und hochbrechenden $\lambda/4$ -Schichten, abgekürzt mit L und H bilden jeweils eine Periode. Die Periodenzahl p beträgt Zwei bzw. Drei, weshalb im Text von Zweifach- und Dreifach-Stapeln gesprochen wird. Für das hochbrechende Material wurde Poly-Si und für das niedrigbrechende Material SiO_2 eingesetzt, da beide durch CVD-Prozesse aufgebracht werden können und kompatibel zur Volumen-Mikrotechnologie sind. Aufgrund des großen Brechzahlverhältnisses n_H/n_L von etwa 2,4 wird ein breites Stoppband von $(3 \dots 5) \mu\text{m}$ generiert. Mittels Matrixmethode wurden Reflektion und Phase von Bragg-Reflektoren mit Zweifach- und Dreifach-Stapel berechnet. Dabei zeigte sich, dass bereits Zweifach-Stapel eine ausreichende Reflektion aufweisen und dass zur Vermeidung von Oszillationen der Reflektionskurve eine Antireflex-Beschichtung des Substrats an der Grenzfläche Substrat/Luft notwendig ist. In **Bild 6** sind die gemessenen Ergebnisse von Bragg-Reflektoren mit Zweifach- und Dreifach-Stapel auf $400 \mu\text{m}$ dicken Si-Substraten und einer einfachen $\lambda/4$ -Antireflectionsschicht dargestellt. Bezüglich Reflektivität und Ebenheit im Stoppband haben die Dreifach-Stapel eine bessere Performance als die Zweifach-Stapel. So erreicht der Zweifach-Stapel im Bereich von $(3,2 \dots 4,8) \mu\text{m}$ eine Reflektion von mindestens 94 % und der Dreifach-Stapel eine Reflektion von mindestens 98 %. Ein Nachteil von Bragg-Reflektoren im Vergleich zu Metall-Reflektoren ist jedoch die wellenlängenabhängige Abweichung der Phasenverschiebung der reflektierten Welle von π . Die Phasen-Dispersion vergrößert unter anderem die notwendige Auslenkung des beweglichen Spiegels um 57 % für den Zweifach-Stapel und um 85 % für den Dreifach-Stapel (siehe **Tafel 1**).

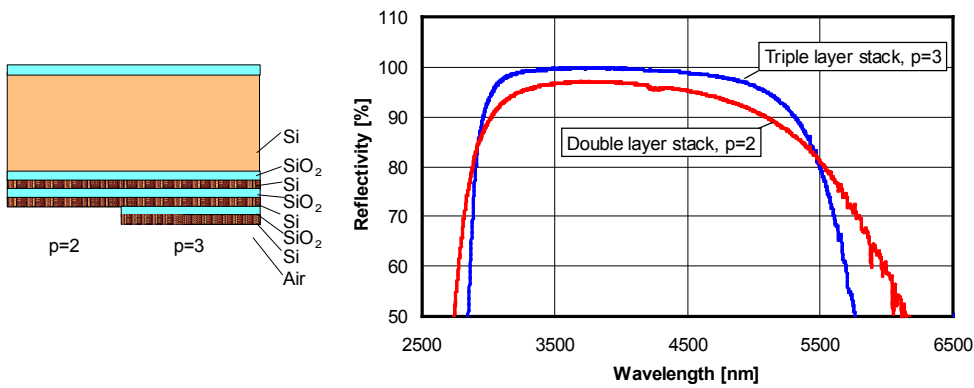


Bild 6 Gemessener spektraler Reflektionsgrad von Bragg-Reflektoren (relativ zu Au-Standard)

Tafel 1 Phasenverschiebung und Spaltkorrektur für Zweifach-Stapel und Dreifach-Stapel (Designwellenlänge 3,4 μm)

Zentral-Wellenlänge	Resonatorspalt ohne Korrektur	Phasenverschiebung Zweifach-Stapel	Resonatorspalt nach Korrektur	Phasenverschiebung Dreifach-Stapel	Resonatorspalt nach Korrektur
3,0 μm	1,5 μm	0,92 π	1,385 μm	0,89 π	1,337 μm
3,4 μm	1,7 μm	1,00 π	1,7 μm	1,00 π	1,7 μm
4,5 μm	2,25 μm	1,14 π	2,57 μm	1,17 π	2,638 μm

Ergebnisse

Das Filter wurde bezüglich seiner mechanischen, elektrischen und optischen Eigenschaften getestet. Ebenheitsmessungen wurden mit einem optischen Interferometer durchgeführt und sind in **Bild 7** dargestellt. Die Ebenheit des beweglichen Spiegels in Ruhestellung erreicht außerordentlich niedrige Werte von ± 7 nm. Die Verkippung bei Auslenkung beträgt typisch 15 nm.

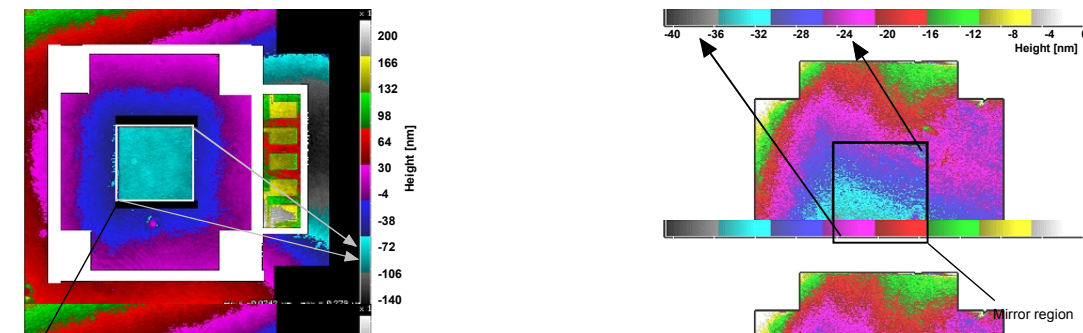


Bild 7 Topographie-Messung eines Filters in Ruhelage und des Spiegels im ausgelenkten Zustand

Eine Kapazitätsänderung von etwa 3 pF und eine Verschiebung von 750 nm für Spannungen bis 15 V konnte an Testmustern aus Ebene 4 und 3 ermittelt werden. Die Transmissions-Messung mit einem FTIR-Spektrometer wurde an Mustern mit Zweifach-Stapel ohne Ebene 1 und teilweise ohne Ebene 2 durchgeführt, wodurch nur die kurzwellige Hälfte des Abstimmereichs genutzt werden kann. Die Zentralwellenlänge (ZWL) ohne elektrostatische Auslenkung beträgt etwa 3,9 μm (siehe **Bild 8**). Bei den Mustern mit paralleler Federführung (Ebene 4+3+2) sind Antriebsspannungen von 24 V notwendig um die ZWL auf 3,0 μm zu reduzieren, während bei den Mustern ohne parallele Federführung (Ebene 4+3) aufgrund der halben Federzahl schon eine Spannung von 15 V ausreicht. Die Vorteile der parallelen Federführung bezüglich Reproduzierbarkeit zeigen sich anschaulich in Bild 8. Die spektrale Bandbreite der Muster beträgt (50...60) nm. Die Spitzentransmission in Ruhelage misst ungefähr 50 % und verringert sich beim Durchstimmen bis 3,0 μm nur um wenige Prozent. Die Blockung des Filters ist geringer als 0,5 %. Die Finesse des Filters beträgt etwa 60, was nur geringfügig unter der Reflektions-Finesse von 80 liegt, was wiederum für die parallele Federführung spricht. In **Bild 9** ist dargestellt, wie sich schräg einfallende Strahlung auswirkt. In Übereinstimmung mit der Theorie verringern sich Zentralwellenlänge und maximale Transmission, wobei der Effekt stärker als berechnet ist. Als Ursache wird die einfache $\lambda/4$ -Antirefleksionsschicht angenommen.

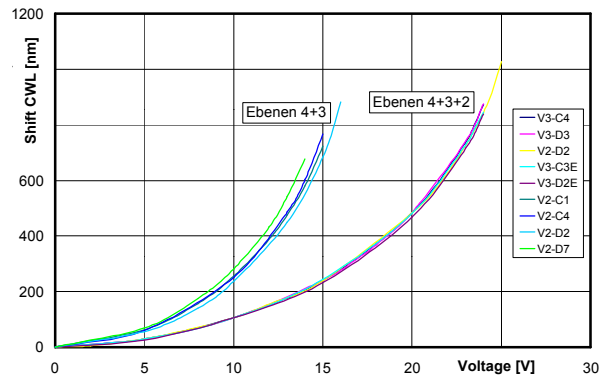
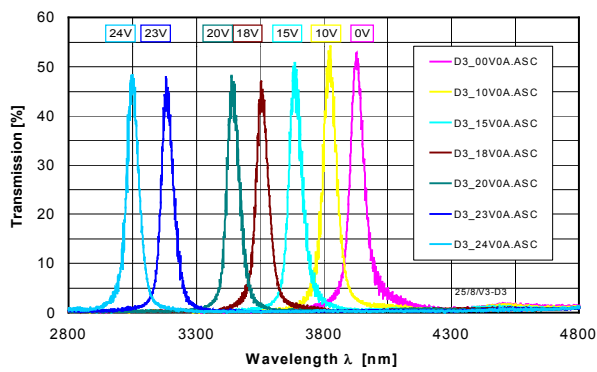


Bild 8 Filtertransmission und Änderung der Zentralwellenlänge in Abhängigkeit von der Steuerspannung

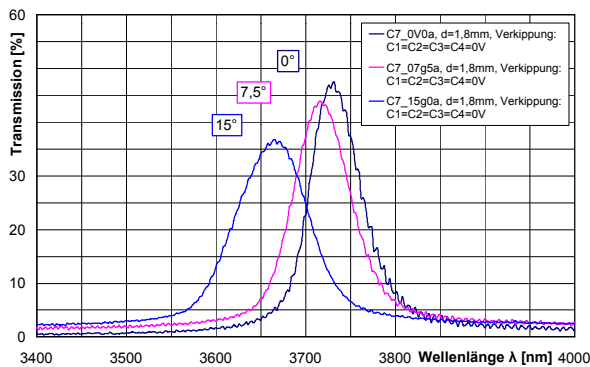


Bild 9 Filtertransmission in Abhängigkeit vom Einfallswinkel

Zusammenfassung und Diskussion

Ein elektrisch durchstimmbares Fabry-Perot-Filter für die NDIR-Gasanalyse wurde aufgebaut. Mittels Volumen-Mikromechanik und doppelseitig polierten 300 μm dicken Si-Wafern konnten ebene Spiegel realisiert werden. Zweifach-Stapel aus alternierenden Poly-Si und SiO_2 Schichten zeigen eine ausreichende Reflektion von mehr als 94 % im Bereich von (3,2...4,8) μm . Erstmals kam eine parallele Federaufhängung als Festkörpergelenk für den beweglichen Spiegel zum Einsatz, welche die Spiegelverkipfung bei der Auslenkung durch elektrostatische Antriebe auf etwa 15 nm begrenzt. Durch Steuerspannungen bis 24 V kann man die Zentralwellenlänge von 3,9 μm auf 3,0 μm verringern. Durch Hinzufügen der Ebene 1 kann auch der Bereich von 3,9 μm bis mindestens 4,8 μm genutzt werden. Die Filter zeichnen sich durch eine geringe spektrale Bandbreite von (50...60) nm und eine Finesse von etwa 60 aus. Weitere Verbesserung werden durch die Verwendung von optischen Dreifach-Stapeln und eine bessere Antireflektions-Beschichtung der Si-Substrate erwartet. Ein Redesign zur Verringerung von Komplexität und Waferzahl ist in Vorbereitung.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des SMWA (Vertrags-Nr. 6727/1047) gefördert.

Literatur

- [1] J.-L. Leclercq, M. Garrigues, X. Letartre, C. Seassal, P. Viktorovitch: *InP-based MOEMS and related topics*, J. Micromech. Microeng. 10 (2000), S. 287-293
- [2] P. Bondavalli, T. Benyattou, M. Garrigues, J. L. Leclercq, S. Jourba, C. Pautet, X. Hugon: *Opto-mechanical design of tuneable InP-based Fabry-Perot filter for gas analysis*, Sensors and Actuators A 94 (2001), S. 136-141
- [3] J. H. Correia, M. Bartek, R. F. Wolffenbuttel: *Bulk-micromachined tuneable Fabry-Perot microrinterferometer for the visible spectral range*, Sensors and Actuators 76 (1999), S. 191-196
- [4] M. Bartek, J. H. Correia, R. F. Wolffenbuttel: *Silver-based reflective coatings for micromachined optical filters*, J. Micromech. Microeng. 9 (1999), S. 162-165
- [5] Letho, M. Blomberg, A. Torkkeli: *Electrically adjustable optical filter*, International Patent WO 98/14804
- [6] J. L. Kuhn, R. B. Barclay, M. A. Greenhouse, D. B. Mott, S. Satyapal: *Electro-mechanical simulation of a large aperture MOEMS Fabry-Perot tunable filter*, Proc. of SPIE Vol. 4178, 2000, S. 325-335