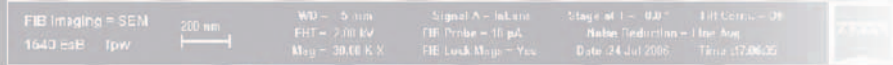


Weit durchstimmbare Fabry-Perot-Filter mit InP/Luft-Spiegeln



Thomas Kusserow, Sören Irmer, Dharmarasu Nethaji, Hartmut Hillmer, Universität Kassel
Balasubramanian Vengatesan, Canare Electric Co. Ltd., Japan

Mit durchstimmbaren optischen Filtern können weite Bereiche in der Messtechnik und Datenkommunikation von nur einem oder wenigen Bauelementen abgedeckt werden. Fabry-Perot-Filter in MOEMS-Bauweise nutzen die physikalischen und prozesstechnischen Vorteile der Miniaturisierung. Ihre Kavitätslänge wird elektrostatisch verändert – mit optischen Durchstimmbereichen bis 221 nm im Bereich um 1,55 μm .

Optische Bauelemente in Fabry-Perot-Anordnung werden nicht nur als Interferometer oder Laserresonatoren verwendet, sondern vielfach als schmalbandige optische Filter in der Datenübertragung und Messtechnik eingesetzt. In Multiplexsystemen (z.B. DWDM), bei denen eine Vielzahl von Datensignalen in einer Glasfaser übermittelt werden, trennen sie Kanäle auf der Empfängerseite. Für spektroskopische Untersuchungen können die Filter auf spezielle spektrale Linien abgestimmt werden. Filter, die über einen weiten Bereich durchstimmbare sind, bieten einige grundlegende Vorteile gegenüber herkömmlichen, statischen Ausführungen: In Demultiplexern können verschiedene Kanäle mit nur einem Bauelement eingestellt werden, in der Spektroskopie größere Wellenlängenbereiche vermessen werden. Durch die durchstimmbare Wellenlänge sind die Filter flexibel einsetzbar, da mit einer geringen Anzahl von Bauelementen ein weiter Spektralbereich kontinuierlich abgedeckt wird. Ebenso kann eine dynamische Anpassung der Filterwellenlänge

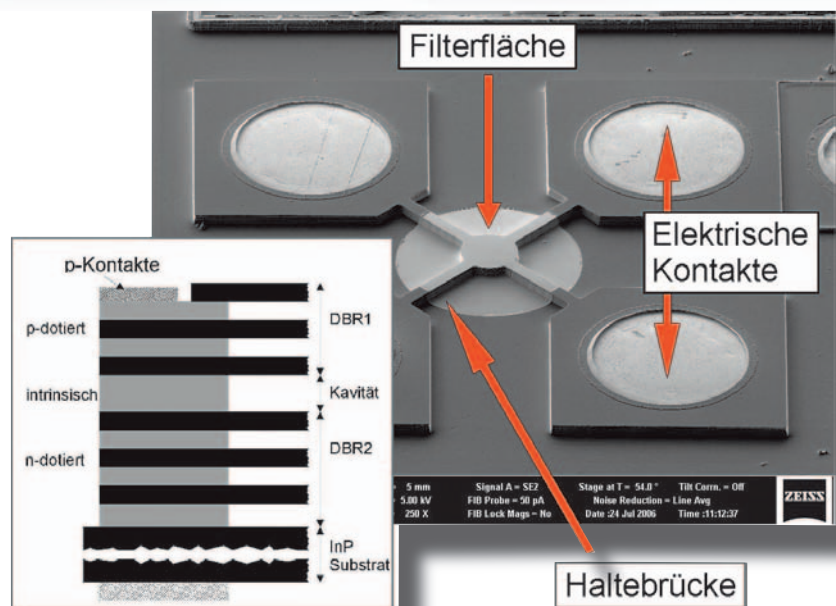


Bild 1: Aufbau eines Filters mit Beschreibung der Funktionselemente (rechts) und Querschnitt am Übergang von Halteblock und Filtermembran (links)

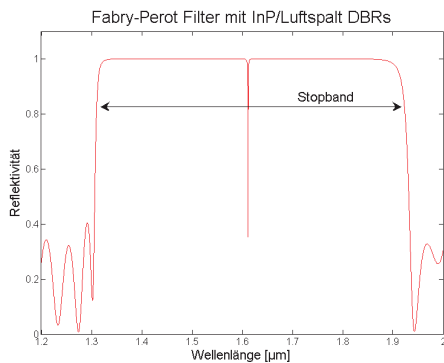


Bild 2: Berechnetes Reflexionsspektrum eines Fabry-Perot-Filters mit InP/Luft-DBR-Spiegeln und λ -Kavität. Die Filterwellenlänge kann in einem weiten Bereich der Stopbandbreite durchgestimmt werden

stattfinden, um zum Beispiel zwischen Kanälen umzuschalten, oder Veränderungen der Lichtquelle auszugleichen. In der optischen Datenübertragung und auch für messtechnische Anwendungen sind faseroptische Systeme von grundlegender Bedeutung. Da Glasfasern Licht mit Wellenlängen um $1,55 \mu\text{m}$ nur geringfügig absorbieren, wird für die Filter Indiumphosphid verwendet. Dieser Verbindungshalbleiter mit direktem Bandübergang bietet die beste Basis für eine Integration von aktiven und passiven optoelektronischen Bauelementen in diesem Bereich. Überdies deckt es den messtechnisch interessanten Nah-Infrarotbereich zwischen 1 und $2 \mu\text{m}$ ab. Die MOEMS-Bauweise (Mikro-Opto-Elektro-Mechanische Systeme) bietet für die Herstellung der Fabry-Perot-Filter die Vorteile hoher Integrationsdichte, paralleler Prozessierung vieler Bauelemente, sowie die Möglichkeit, longitudinal einmodige Kavitäten zu realisieren. Insbesondere sind aber die Kräfteverhältnisse im Nano- und Mikrometerbereich von entscheidender Bedeutung. Betrachtet man die verschiedenen physikalischen Kräfte mit einem Skalierungsfaktor, zeigt sich, dass für kleine Strukturen die mechanischen und magnetischen Kräfte an Einfluss verlieren, aber thermische Ausdehnung und elektrostatische Kräfte dominant werden [1]. Dies kann nicht nur für Stellbewegungen ausgenutzt werden, sondern erklärt auch den geringen Verschleiß und die hohe mechanische Stabilität solcher stark miniaturisierter Bauelemente.

Funktionsweise und Eigenschaften

Der Aufbau der durchstimmbaren Filter ist in **Bild 1** dargestellt. Die runde Filterfläche wird über vier Verbindungsbrücken an Halteblöcken befestigt, die gleichzeitig

zur elektrischen Kontaktierung dienen. Im Querschnitt ist die Kavität zwischen den beiden Spiegeln zu sehen. Um eine ausreichend hohe Reflektivität und damit auch eine hohe Finesse zu erreichen, werden Braggreflektoren (DBR) verwendet. Diese sind als wechselnde Schichtfolge von InP-Membranen und Luftspalten ausgeführt, um einen möglichst hohen Brechungsindexkontrast zu erreichen. Hierdurch wird die Breite des Stopbandes festgelegt, die deutlich breiter als der Durchstimmbereich sein sollte. Außerdem werden schon nach nur 2,5 Perioden (d.h. drei Membranen) Reflektivitäten $>99,5\%$ erzielt. Durch die Eigenschaften der DBRs sind longitudinal einmodige Filter auch bei Kavitätslängen $>\lambda/2$ realisierbar, wenn die höheren Moden spektral außerhalb des Stopbandes liegen. Auf diese Weise kann auch die Linienbreite der Filter beeinflusst werden (**Bild 2**). Der Durchstimmvorgang wird elektrostatisch durchgeführt. Einer der Spiegel ist hierzu n-dotiert, der andere p-dotiert und die Kavitätsschicht ist undotiert und damit eigenleitend. Durchgestimmt wird der Filter, indem an die Spiegel eine Spannung in Sperrrichtung angelegt wird. Dadurch ändert sich die Kavitätslänge und folglich auch die Filterwellenlänge.

Herstellung der Filter

Die Herstellung der Filterstrukturen mittels Verfahren der Mikro- und Nanotechnologie unter Reinraumbedingungen gliedert sich in vier grundlegende Arbeitsschritte (**Bild 3**), die durch weitere Zwischenschritte ergänzt werden. Zunächst wird ein Multischichtsystem aus InP-Schichten – den späteren Filtermembranen – und GaInAs-Opferschichten epitaktisch aufgewachsen. Die Opferschichten werden später entfernt, um die Luftspalte zu realisieren. Die Schichten entstehen mittels des MOCVD-Verfahrens (Metal Organic Chemical Vapor Deposition), mit dem kristalline Schichten im nm-Bereich mit hoher Oberflächenqualität abgeschieden werden können. In diesem Schritt werden außerdem die beiden Spiegel und die Schichten für elektrische Kontakte dotiert. Der nächste Schritt legt die Form der Bauelemente fest. Hierzu wird eine photolithographisch aufgebraachte Resistmaske durch ein Trockenätzverfahren (RIE) in das InP/GaInAs-Multischichtsystem übertragen. Da das Material nur physikalisch durch Ionenbeschuss abgetragen wird hat der Prozess nur eine geringe Selektivität und beide Schichten werden ähnlich schnell geätzt. Der Abtrag ist anisotrop, d.h. hier nur vertikal zur Substratebene und führt zu senkrechten Ätzflanken

(Mesastruktur). Anschließend sollen die GaInAs-Opferschichten entfernt werden, um die Luftspalten zu erhalten. Hierzu wird ein nasschemisches Ätzverfahren (FeCl_3 -Lösung) eingesetzt, das hochselektiv nur das GaInAs entfernt, ohne das InP anzugreifen. Im abschließenden Prozessschritt muss die Ätzlösung aus den Zwischenräumen im Filter entfernt werden. Da bei konventionellen Trocknungsverfahren die Kapillarkräfte die dünnen Membrane kollabieren lassen, wird eine sogenannte „Kritische-Punkt-Trocknung“ durchgeführt. In CO_2 -Umgebung (flüssig) werden Druck und Temperatur so eingestellt, dass der kritische Punkt überschritten wird, also die Phasengrenze zwischen flüssigem und gasförmigem Zustand nicht mehr existiert und das CO_2 schonend entfernt werden kann. Weitere Zwischenschritte bei der Herstellung der Fabry-Perot-Filter dienen dem Abscheiden von elektrischen Kontakten oder sind prozessbedingt, wie z.B. die Herstellung von Ätzschutzschichten. Ein spezielles Problem von unterätzten MEMS-Strukturen sind Verspannungen in Schichten, die in unserem Falle zu Verformungen und Aneinanderhaften der Filterflächen führen und das Bauteil damit zerstören. Für die Verbindungshalbleiter ist zwar ein gitterangepasstes Wachstum gewährleistet, allerdings kommt es zu ungewollten und nicht vermeidbaren Materialverschleppungen von Arsen aus den GaInAs-Schichten in den unteren Teil

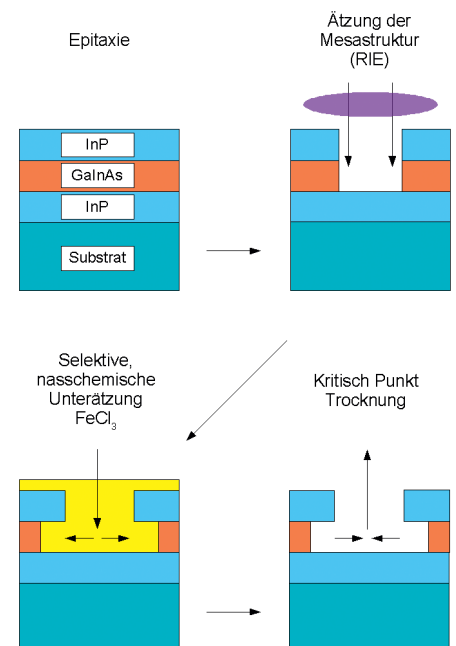


Bild 3: Symbolische Darstellung der vier grundlegenden Prozessschritte bei der Herstellung der MOEMS-Filter, vereinfacht mit nur einer GaInAs-Opferschicht (orange)

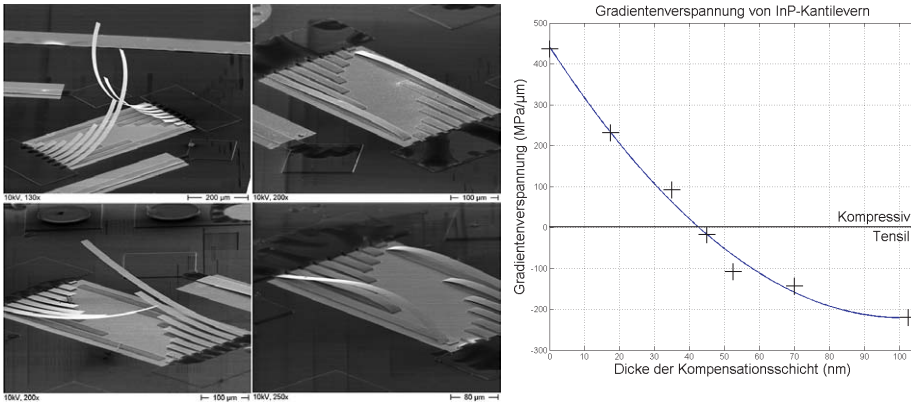


Bild 4: Für kompressive Verspannung biegen sich die Kantilever nach oben (links), für den tensilen Fall nach unten (rechte Bilder). Durch Anpassung von Kompensationsschichten verschiedener Dicke kann eine Verformung vermieden werden. Der Messdatengraph zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung

der InP-Schichten [2]. Die daraus resultierende Gradientenverspannung führt zu stark verformten Strukturen. Um die Gitterfehlpassung in den InP-Schichten wieder zu korrigieren, werden bei der Epitaxie Kompensationsschichten eingebaut, die der Verspannung entgegenwirken. Das Verhalten der Kompensation kann sehr gut an Biegebalkenstrukturen (Kantilever) untersucht werden, die zu diesem Zweck als Teststrukturen mitprozessiert werden. Die Ergebnisse von unterschiedlich dicken Kompensationsschichten sind in **Bild 4** dargestellt, wobei für 43 nm Verspannungsfreiheit erreicht wird [3].

Ergebnisse und Erweiterungen

Verschiedene auf diese Art gefertigte Fabry-Perot-Filter haben bei der optischen Charakterisierung weite Durchstimmbereiche gezeigt. Filter mit einer sehr geringen Aktuationsspannung von 3,2 V konnten über 142 nm [4] durchgestimmt werden, Filter die explizit für noch weitere Durchstimmung entworfen wurden erreichten

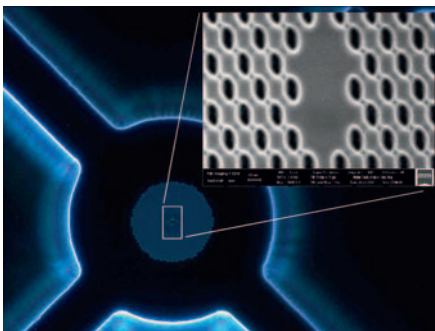


Bild 6: Zusätzliche photonische Kristalle oder diffraktiv-optische Strukturen auf den Filtermembranen ermöglichen z.B. polarisationsselektive Eigenschaften

221 nm bei 28 V (**Bild 5**) [5]. Die Dauer für die mechanische Abstimmung über den gesamten Bereich liegt in der Größenordnung von 10 μ s.

Durch die Integration einer Photodetektorstruktur, sowie die Strukturierung der Filtermembranen mit diffraktiv-optischen Elementen oder photonischen Kristallen (**Bild 6**) lassen sich die Filtereigenschaften erweitern oder verbessern. Beispiele hierfür sind polarisationsoptische Selektivität [6] oder auch die Kontrolle lateraler Moden. Da Fabry-Perot-Filter auch als Laserkavitäten verwendet werden können, werden außerdem durchstimmbare VCSEL für den Bereich $>1,3 \mu$ m untersucht [7,8].

Fazit

Die vorgestellten MOEMS Fabry-Perot-Filter können über einen weiten Bereich im nahen Infrarot durchgestimmt werden und bieten damit vielseitige Anwendungsmöglichkeiten in Photonik und Spektroskopie. Es können die Vorteile der Miniaturisierung ausgenutzt werden, die neben praktischen Gründen der Prozessierung und Integration vor allem aus den Kräfteverhältnissen in diesem Bereich resultieren. Verbindungshalbleiter wie InP sind als Materialsysteme im optoelektronischen Bereich aufgrund der Bandstrukturen unerlässlich, auch wenn die Prozessführung gegenüber Si deutlich komplexer ist. Zukünftige Weiterentwicklungen werden aktive und passive Bauelemente einschließen, sowie strukturierte Filterflächen.

Literaturhinweise

[1] E. Ataro, C. Prott, F. Römer, H. Hillmer, *Tailored scaling: a possibility to improve the performance of ultra-wide continuously tunable photonic devices*, Applied Physics, B, 79, 87 (2004)

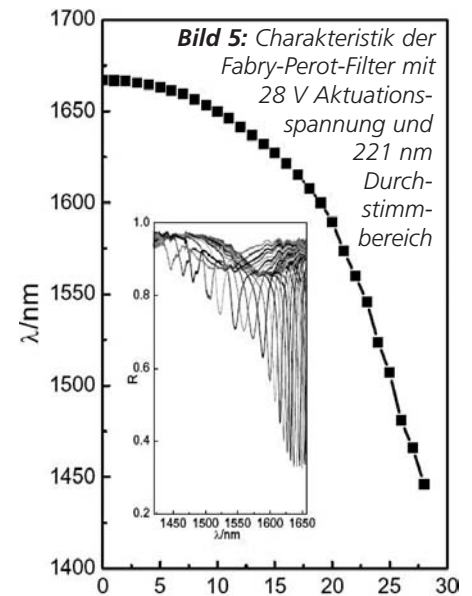


Bild 5: Charakteristik der Fabry-Perot-Filter mit 28 V Aktuationsspannung und 221 nm Durchstimmbereich

[2] M. Strassner, J. Daleiden, N. Chitica, D. Keiper, B. Staltnacke, S. Greek, K. Hjort, *III-V semiconductor material for tunable Fabry-Perot filters for coarse and dense WDM systems*, Sensors and Actuators A 85 (2000) pp. 249–255

[3] T. Kusserow, N. Dharmarasu, H. Hillmer, T. Nakamura, T. Hayakawa, B. Vengatesan, *Tailored Stress in InP/GaInAs Layers for InP/Air-gap DBR-Filters with Photonic Crystals*, Proceedings Optical MEMS, pp.88–89, (2006)

[4] S. Irmer, J. Daleiden, V. Rangelov, C. Prott, F. Römer, M. Strassner, A. Tarraf, H. Hillmer, *Ultra low biased widely continuously tunable Fabry-Pérot Filter*, IEEE Phot. Technol. Lett. 15, (2003), pp. 434–436

[5] A. Hasse, S. Irmer, J. Daleiden, N. Dharmarasu, S. Hansmann, H. Hillmer, *Wide continuous tuning range of 221 nm by InP/Air-gap vertical-cavity filters*, Electron. Lett. 42, 974 (2006)

[6] S. Boutami, B. Ben Bakir, J.-L. Leclercq, X. Letartre, P. Rojo-Romeo, M. Garrigues, I. Sagnes, L. Legratiet, M. Strassner, *Highly selective and compact tunable MOEMS photonic crystal Fabry-Perot filter*, Optics Express, Vol. 14, No. 8, (2006), pp. 3129–3137

[7] C. Prott, F. Römer, E. Ataro, J. Daleiden, S. Irmer, A. Tarraf, H. Hillmer, *Modeling of Ultra-Widely Tunable Vertical Cavity Air-Gap Filters and VCSELs*, IEEE J. of Select. Topics in Quantum. Electron., 9, 918 (2003)

[8] M. Maute, B. Kögel, G. Böhm, P. Meissner, M.-Ch. Amann, *MEMS-Tunable 1.55 μ m VCSEL With Extended Tuning Range Incorporating a Buried Tunnel Junction*, IEEE J. of Select. Topics in Quantum. Electron., Vol. 18, No. 5, (2006), pp. 688–690

Kontakt

Thomas Kusserow
 Universität Kassel
 Institut für Nanostruktur-
 technologie und Analytik
 Technische Elektronik
 Heinrich-Plett-Str. 40
 D-34132 Kassel
 Tel. 0561/804-4315
 Fax 0561/804-4488



eMail: kusserow@ina.uni-kassel.de
 Internet: www.ina.uni-kassel.de