

Atomchips mit integrierten optischen Gittern zur Erzeugung von Bose-Einstein-Kondensaten

A. Kassner^{1*}, F. Dencker^{1*}, C. Künzler^{1*}, H. Heine^{2*}, W. Herr^{2*}, M. Christ³, M. Krutzik³, E. M. Rasel^{2*} und M. C. Wurz^{1*}

Institute:

¹ Institut für Mikroproduktionstechnik, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany

² Institut für Quantenoptik, Welfengarten 1, 30167 Hannover, Germany

³ Joint Lab Integrated Quantum Sensors, Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik, Gustav-Kirchhoff-Straße 4, 12489 Berlin

* Laboratory of Nano and Quantum Engineering, Schneiderberg 39, 30167 Hannover, Germany

Einleitung

Die Nutzung von hochpräzisen Materiewelleninterferometern im Feld oder unter Weltraumbedingungen bedingt eine Miniaturisierung des Gesamtsystems. Insbesondere der Einsatz auf Satelliten und Forschungsraketen erfordert eine Begrenzung der Masse und des Volumens der Nutzlast. Durch die Gittertechnologie wird die Aufteilungsoptik hinter den Lasern und das Heranführen des Lichts an die Atome vereinfacht. Anstelle das Licht auf vier Wege aufzuteilen und diese zueinander und auf die Atome justieren zu müssen, bleibt lediglich ein Strahl übrig, der auf die Atome justiert werden muss. Ferner bedingt die mikrotechnologische Integration solcher Gitter in die Atomchip-Oberfläche einen Verzicht auf adhäsive Fügeverfahren und reduziert somit die Ausgasrate im Vakuum. Neben einer Verbesserung der Vakuumqualität kann die Pumpenleistung und damit die Nutzlast weiter reduziert werden. Am Institut für Mikroproduktionstechnik (IMPT) werden in Kooperation mit dem Institut für Quantenoptik (IQ) Atomchips als Bestandteil von magneto-optischen Fallen für kompakte Materiewelleninterferometer entwickelt. Zusätzlich werden am Ferdinand-Braun-Institut (FBH) miniaturisierte, mikro-integrierte optische Aufbauten entwickelt und die benötigten Integrationstechnologien hinsichtlich Vakuumkompatibilität qualifiziert [1]. Im Rahmen der QUANTUS Kollaboration gelang es in Fallturmversuchen erstmals ein Bose-Einstein-Kondensat (BEK) in Mikrogravitationsumgebungen zu erzeugen [2]. Mit dieser Fallturmapparatur wurde erstmals auch ein auf BEK basierendes Atominterferometer realisiert [3]. Die Nachfolgeapparatur QUANTUS-2 führte zu einer weiteren Miniaturisierung, deren Leistungsfähigkeit mit den derzeit besten laborgebunden Aufbauten vergleichbar ist [4]. Die Ergebnisse und Erfahrungen, die mit den Fallturmexperimenten errungen werden konnten, führten zu Höhenforschungsraketenmissionen. In der ersten Mission (MAIUS I) gelang es erstmals ein BEK im Weltraum zu erzeugen und mit Hilfe der Atominterferometrie zu charakterisieren [5].

Systemaufbau und Realisierung der optischen Gitter

Das in Bild 1 dargestellte CAD-Modell zeigt das Atomchip-System, welches auf einem siliziumbasierten Multichip Aufbau aus Science- und Base-Chip basiert. Ein aus Keramik gefertigtes Trägersystem dient zur Aufnahme der Atomchips und der mesoskopischen Strukturen. Das optische Gitter wird als Funktionsschicht des Science-Chips realisiert. Zur Veranschaulichung des Systems ist das optische Gitter in Bild 1 teiltransparent dargestellt. Das Ziel ist es, die Gitter im Rahmen des Herstellungsprozesses auf den Atomchip zu integrieren, um den Einsatz von Klebstoffen für eine Verbindung eines separaten Chips zu vermeiden. Diese Klebeverbindung kann zu Ungenauigkeiten in der Justage und darüber hinaus zu einer hohen Ausgasungsrate führen, da die vollständige, homogene Konditionierung dieser Klebstoffschicht nicht möglich ist. Hierdurch würde die Vakuumqualität begrenzt und eine Vergrößerung der Vakuumpumpleistung wäre erforderlich. Durch die Reduzierung der Ausgasungsrate wäre es möglich, die Pumpenleistung und damit die Nutzlast weiter zu reduzieren. Diese Gitter haben geometrische Abmessungen im Submikrometerbereich und werden am IMPT mikrotechnisch hergestellt. Neben der Strukturierung des Siliziumsubstrats können auch zusätzliche Funktionsschichten aus verschiedenen Materialien aufgebracht und strukturiert werden. Durch Kathodenerstäubung und Aufdampfen können sowohl metallische als auch Isolatorschichten im Nano- und Mikrobereich aufgebracht werden. PECVD- und Atomlagenabscheidung können auch zur Herstellung von Schichten mit optischer Qualität verwendet werden. Um einen elektrischen Kurzschluss der Leiterbahnen zu verhindern, wird zunächst im Bereich des optischen Gitters eine Isolationschicht auf der Atomchip Oberfläche aufgebracht. Darauf aufbauend folgt das für das optische Gitter verwendete Material, beispielsweise Al oder Au. Da sich die Strukturgrößen des optischen Gitters im

Submikrometer-Bereich befinden, erfolgt die Strukturierung mittels Elektronenstrahlolithographie in einem zuvor applizierten Fotolack mit einem Rasterelektronenmikroskop vom Typ Zeiss LEO 1455VP, welches mit einem ELPHY Quantum pattern generator der Firma Raith ausgerüstet ist. Als Fertigungsverfahren kommen sowohl Ätzverfahren als auch Lift-off Techniken in Frage. Die notwendige Ätztiefe beziehungsweise die Schichtdicke im Falle des Lift-off Prozesses hängt von der verwendeten Wellenlänge der Laserquelle ab. Im Falle von Rb Atomen liegt sie bei 195 nm bei einer Periode von 1.200 nm mit einem 1/1 Welle/Tal-Verhältnis. Bild 2 zeigt ein optisches Gitter in Form von konzentrischen Dreiecken, dass sich aus drei 1D-Gittern mit $N = 2$ ($N =$ Anzahl der Beugungsrichtungen) zusammensetzt. Die Realisierung des Gitters erfolgte in diesem Fall in einer Au-Schicht, welche per Kathodenzerstäubung appliziert worden ist. Als Fotolack diente der Negativlack nLof 2070, verdünnt mit PGMEA im Verhältnis 1:3, um Lackdicken im Bereich von 300 nm zu erzielen. An die Elektronenstrahlolithographie schloss sich ein anisotroper, ionenstrahlbasierter Ätzvorgang an. Analog dazu lassen sich 2D Gitter mit $N = 4$ wie beispielsweise Schachbrettmuster fertigen. Ein alternativer Ansatz kommt ohne zusätzliche Funktionsschichten auf der Atomchip-Oberfläche aus. Dafür wird die Si-Oberfläche des Atomchips selbst in den Bereichen um die Leiterbahnen strukturiert, indem das Si anisotrop durch reaktives Ionentiefenätzen oder Ionenstrahlätzen geätzt und anschließend mit einer reflektierenden Schicht beschichtet wird.

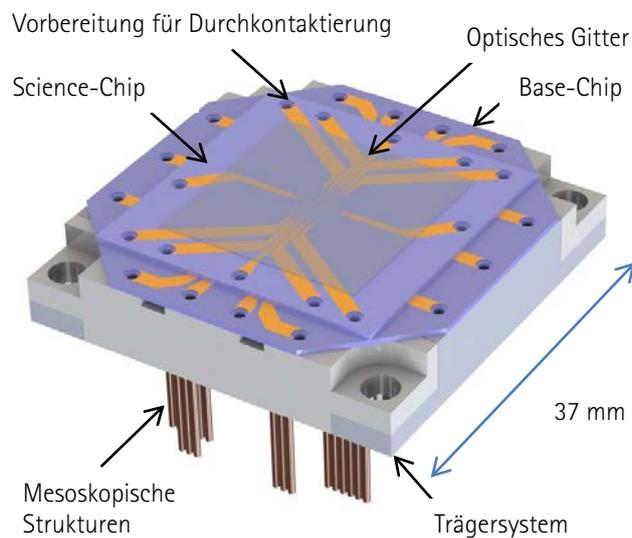


Bild 1 Aufbau des Atomchip-Systems

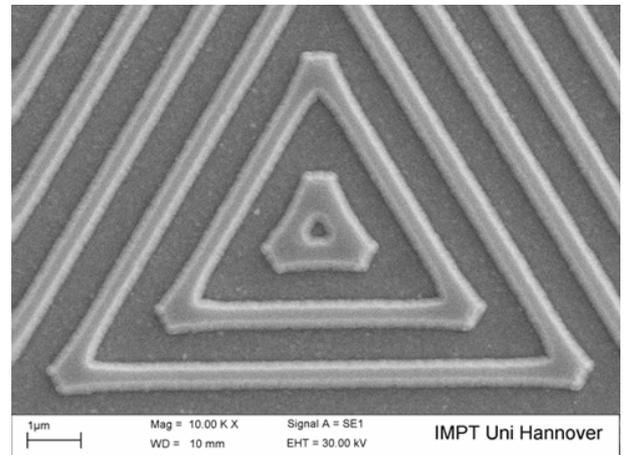


Bild 2 Optisches Gitter bestehend aus drei 1D-Gittern

References

- [1] Christ, M., Kassner, A., Smol, R., Bawamia, A., Heine, H., Herr, W., ... & Krutzik, M. (2019). Integrated atomic quantum technologies in demanding environments: development and qualification of miniaturized optical setups and integration technologies for UHV and space operation. *CEAS Space Journal*, 1-6.
- [2] van Zoest, T., Gaaloul, N., Singh, Y., Ahlers, H., Herr, W., Seidel, S. T., Ertmer, W., Rasel, E.M.,... & Arnold, S. (2010). Bose-Einstein condensation in microgravity. *Science*, 328(5985), 1540-1543.
- [3] Müntinga, H., Ahlers, H., Krutzik, M., Wenzlawski, A., Arnold, S., Becker, D., ... & Gherasim, C. (2013). Interferometry with Bose-Einstein condensates in microgravity. *Physical review letters*, 110(9), 093602.
- [4] Rudolph, J., Herr, W., Grzeschik, C., Sternke, T., Grote, A., Popp, M., Ertmer, W., Rasel, E.M., ... & Lämmerzahl, C. (2015). A high-flux BEC source for mobile atom interferometers. *New Journal of Physics*, 17(6), 065001.
- [5] Becker, D., Lachmann, M. D., Seidel, S. T., Ahlers, H., Dinkelaker, A. N., Grosse, J., Rasel, E.M.,... & Wenzlawski, A. (2018). Space-borne Bose-Einstein condensation for precision interferometry. *Nature*, 562(7727), 391-395.