

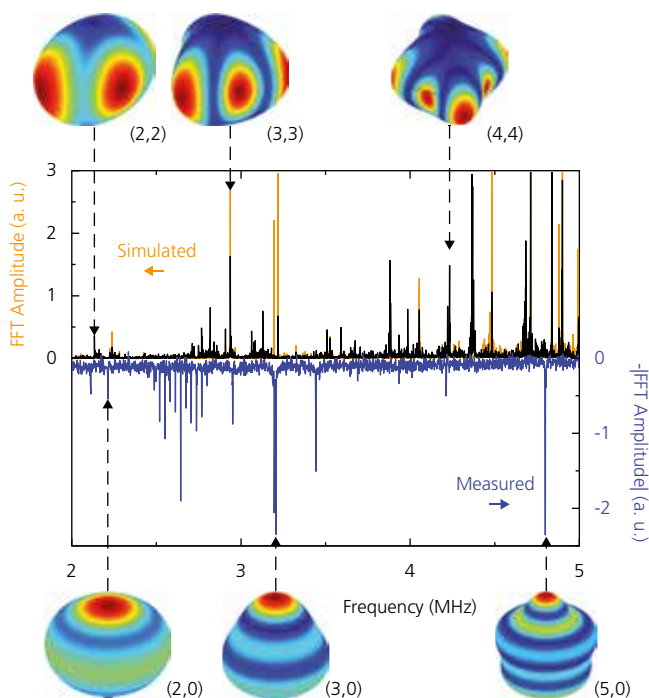
VIBRATING DIAMOND SPHERES

VADIM LEBEDEV

TEL. +49 761 5159-507

VADIM.LEBEDEV@IAF.FRAUNHOFER.DE

Resonators based on micro electromechanical systems (MEMS) are a matter of intense research pursuing to replace semiconductor components in prospective radio frequency (RF) devices. The superior advantage of MEMS resonators is their high quality factors ($Q \sim 10^4 - 10^5$), which are orders of magnitude higher than those typical for electronic components. A high Q contributes to improved frequency selectivity and phase stability along with a reduced level of insertion loss. Here, high- Q spherical MEMS oscillators, which consist of a silicon core and a thick nano-diamond shell, are demonstrated with the aim of displaying their potential in RF bandpass filters and reference oscillators.



1 Vibrational spectra of ultra-high-precision NCD-shell/Si-core spherical resonator with an outer diameter of 2.27 mm. Insets: the shapes of some zonal ($S(l,0)$) and sectoral ($S(l,m=l)$) modes used for peak identification. The color coding represents the magnitude of the total displacement in the oscillator body.

Schwingungsspektren von hochgenauen kugelförmigen Resonatoren, bestehend aus NCD-Hülle/Si-Kern mit einem Außendurchmesser von 2,27 mm. Eingefügt sind die Formen einiger Zonen ($S(l,0)$)-sowie Sektor ($S(l,m=l)$)-Moden zur Zuordnung der Resonanzen. Die Farbkodierung stellt die Größe der Auslenkung der Oberfläche des Oszillators dar.

Micro-electromechanical systems based on nano-crystalline diamond (NCD) thin films have superior advantages for radio frequency (RF) applications due to high acoustic velocity of 18,000 m/s and very low predicted fundamental phonon scattering rate. High- Q flexural beam resonators based on diamond thin films are frequently reported for applications in the sub-MHz range. However, an enormous impact of the clamping losses restricts the beam's operation in the RF band.

Recently, advanced forms of bulk-mode resonators such as solid diamond disks have been utilized for electromechanical oscillators, considerably decreasing the clamping losses. In particular, the systems operating at volume conserving »whispering gallery« modes (WGM) were demonstrated with Q as high as 10^5 at a frequency of 0.5 GHz. Sectoral spheroidal modes (SSM) are the equivalent of WGM in spherically symmetric systems, representing an ideal volume/energy conserving form for mechanical oscillators. Similar to WGM, the resonator displacement in SSM is strictly confined near the sphere equator, thereby minimizing the anchor and intrinsic material losses in the oscillator core.

The high- Q spherical resonators, which consist of a silicon core and a thick NCD shell (Fig. 3), are demonstrated at Fraunhofer IAF. The aim of these studies is to evaluate the potential of nano-diamond spheres in RF bandpass filters and reference oscillators. For this purpose, the mechanical vibrations of such devices are numerically simulated, precisely measured and thoroughly analyzed.

SCHWINGENDE DIAMANTKUGELN

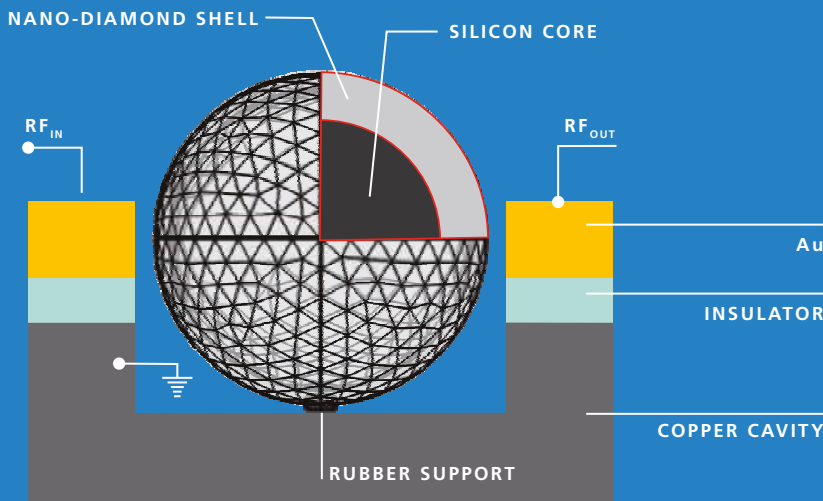
Auf mikro-elektromechanischen Systemen (MEMS) basierende Resonatoren sind Gegenstand intensiver Forschungsaktivitäten mit dem Ziel, elektronische Halbleiterbauelemente in zukünftigen Hochfrequenzanwendungen zu ersetzen. Der herausragende Vorteil von MEMS-Resonatoren ist ihr hoher Gütefaktor von $Q \sim 10^4 - 10^5$ im Vergleich zu elektronischen Bauelementen. Ein hoher Gütefaktor geht einher mit verbesserter Frequenz- und Phasenselektivität sowie mit einer geringeren Einfügedämpfung. Um das Potenzial mikro-elektromechanischer Oszillatoren für Bandpassfilter und als Referenzoszillator aufzuzeigen, werden im Folgenden kugelförmige MEMS-Resonatoren, bestehend aus einem Siliziumkern und einer dicken nanokristallinen Diamanthülle, vorgestellt.

Aufgrund der großen Schallgeschwindigkeit von 18 000 m/s und der prognostizierten sehr geringen Phononenstreuung sind Mikrosysteme, die auf nanokristallinem Diamant (NCD) basieren, besonders gut für Hochfrequenzanwendungen geeignet. Für Anwendungen im Sub-MHz-Bereich werden häufig Biegebalken-Resonatoren hoher Güte aus Diamant verwendet. Aufgrund großer Verluste durch die Einspannung ist jedoch ihr Einsatz bei sehr hohen Frequenzen eingeschränkt.

In letzter Zeit kamen weiterentwickelte Formen von Volumen-Moden-Resonatoren, wie massive Diamantscheiben, für elektromechanische Oszillatoren zum Einsatz, wodurch die Einspannverluste bedeutend verringert wurden. Insbesondere wurden Systeme vorgestellt, die mit sogenannten volumenerhaltenden »whispering gallery«-Moden (WGM) mit Gütefaktoren von 10^5 bei einer Frequenz von 0,5 GHz arbeiten. Sogenannte Kugelsektor-Moden (sectoral spherical modes, SSM) entsprechen WGMs in kugelförmigen, symmetrischen Systemen, die eine ideale Form zur Volumen-/Energieerhaltung für mechanische Oszillatoren darstellen. Ähnlich wie bei einem WGM ist die Verschiebung des Resonators bei einem SSM streng auf den Bereich des Äquators der Kugel begrenzt. Dadurch werden Verluste aufgrund der Einspannung sowie intrinsische Materialverluste im Kern des Resonators minimiert.

Das Fraunhofer IAF hat kürzlich kugelförmige Resonatoren hoher Güte vorgestellt, die aus einem Siliziumkern und einer dicken nanokristallinen Diamanthülle bestehen (Abb. 3). Das Ziel der Arbeiten ist, das Potenzial von Nano-Diamantkugeln hinsichtlich des Einsatzes in HF-Bandpassfiltern und Referenzoszillatoren zu untersuchen. Zu diesem Zweck werden die mechanischen Schwingungen dieser Bauteile numerisch simuliert, präzise vermessen und ausgewertet.

Um defektfreie, 100 μm dicke NCD-Beschichtungen zu erhalten, werden hochgenaue Siliziumkugeln mit einer Oberflächenrauheit von $< 3 \text{ nm (rms)}$ in eine ultraschallangeregte Diamant-Methanol-Suspension eingebracht. Mit dieser Methode der Nukleation werden Keimbildungsdichten von 10^{14} m^{-2} erreicht. Die gleichmäßige NCD-Beschichtung erfolgt durch

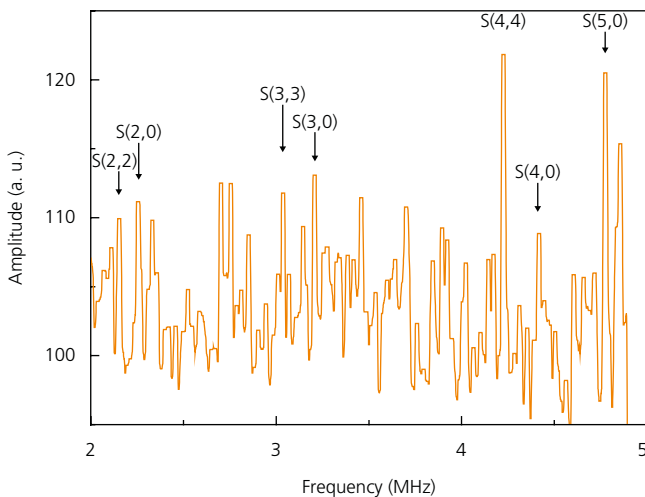


3

To obtain void-free, 100 μm thick NCD coatings, ultra-high precision silicon spheres with a surface roughness of $< 3 \text{ nm}$ (rms) are placed in an ultrasonically agitated nano-diamond-methanol suspension. With this seeding method, nano-particle nucleation densities as high as 10^{14} m^{-2} are achieved. Uniform NCD coating is carried out by continuously rotating the Si spheres during CVD process carried out in a gas mixture of 1 % methane in hydrogen at a deposition temperature of 700 – 860 $^{\circ}\text{C}$. To obtain vibration properties approaching the support-free elastic sphere, the composite oscillators are mounted in a Cu cavity using soft-rubber-like support ($\nu \sim 0.5$).

This allows direct comparison of the simulated and the experimental vibration spectra along with a substantial decrease in support losses.

It is demonstrated that due to the ultra-precision fabrication of the spheres, the calculated spectrum perfectly fits the measured one, allowing for precise identification and analyses of the vibrational modes (Fig. 1). It is also shown that Q factors strongly depend on the displacement distribution over the sphere, favoring the sectoral modes for use in high-Q devices. This is due to the specific nature of these modes, where mechanical SSMs are generated around the equator of the diamond shell, which induces minimal motion at the cylinder volume centered on the z-axis of rotation (mostly Si). Therefore, for the sectoral modes, significant reduction of the intrinsic and the anchor losses in the Si-core and in the Si/NCD interfaces is achieved, resulting in mechanical Q $\sim 10^4$ for the sectoral S(4,4) mode in air.



2 Electrical transmission spectra of the spherical resonator system measured in the frequency range of 2 – 5 MHz. Only zonal and sectoral modes are indicated in the spectrum.

Elektrisches Transmissionsspektrum des kugelförmigen Resonator-systems, gemessen in einem Frequenzbereich von 2 – 5 MHz. Nur Zonen- und Sektor-Moden sind im Spektrum dargestellt.

The mechanical characterization of the spherical resonator is accomplished by electrical transmission measurements using a broadband RF signal. Displayed in Fig. 2, the characteristic peaks in the recorded S21 spectrum correspond well to the main vibration modes shown in Fig. 1, indicating maximum transmission of the electrical signal at the resonant frequencies of the sphere.

Much higher Q values should be achievable for the sectoral modes upon further improvements in the current »proof-of-concept« system design. Next generation electromechanical resonator devices with quality factors as high as $Q \sim 10^5$ require the growth of thicker NCD films to confine the SSM within the diamond shell, along with the reduction of sphere-electrode spacing down to 100 nm – 150 nm in order to increase the coupling coefficient and to decrease the system impedance. This will be targeted by Fraunhofer IAF projects in the next few years.



4

3 Oscillator design and excitation / measurement scheme of a diamond-based spherical resonator.

Schwingungsmodell und Ansteuerungs- / Messeinrichtung eines aus Diamant bestehenden, kugelförmigen Resonators.

4 Top view image of a resonator sphere (diameter ~ 2.27 mm) mounted in a 1.1 mm deep cylindrical copper cavity surrounded by Au/Cu radially arranged electrodes emitting and receiving the RF signal.

Aufsicht auf die Resonator-kugel (Durchmesser ~ 2,27 mm), gelagert in einer 1,1 mm tiefen, zylindrischen Kupferaussparung, umgeben von Au/Cu-Elektroden zum Senden und Empfangen des HF-Signals.

kontinuierliches Rotieren der Siliziumkugeln während des CVD-Prozesses. Die CVD-Abscheidung wird in einer Gasmischung aus 1 % Methan in Wasserstoff bei einer Abscheidetemperatur von 700 – 860 °C durchgeführt. Um die Schwingungseigenschaften zu bestimmen, die denen von freien elastischen Kugeln entsprechen, werden die Oszillatoren in einer Kupferkavität unter Verwendung einer gummiartigen Stütze montiert. Dies erlaubt den direkten Vergleich von simulierten und experimentellen Schwingungsspektren, zusammen mit einer deutlichen Verringerung von Einspannungsverlusten.

Es wird gezeigt, dass aufgrund der ultrapräzisen Herstellung der Kugeln das berechnete Spektrum vollständig mit dem gemessenen übereinstimmt, was eine genaue Zuordnung und Analyse der Schwingungsmoden erlaubt (Abb. 1). Es kann weiterhin demonstriert werden, dass die Gütefaktoren stark von der Verschiebungsverteilung über der Kugel abhängen, sodass die Verwendung von Sektor-Moden in Bauteilen hoher Güte zu bevorzugen ist. Dies liegt in den spezifischen Eigenschaften dieser Moden begründet, bei denen mechanische SSMs um den Äquator der Diamantschicht erzeugt werden. Für die Sektor-Moden wurde dadurch eine deutliche Verringerung der intrinsischen Verluste und der Einspannungsverluste im Siliziumkern sowie an der Si/NCD-Grenzfläche erreicht. Dadurch ergibt sich ein mechanischer Gütefaktor von $Q \sim 10^4$ für die Sektor S (4,4)-Moden in Luft.

Die mechanische Charakterisierung des kugelförmigen Resonators wird durch elektrische Transmissionsmessungen mithilfe eines breitbandigen HF-Signals durchgeführt. Wie in Abb. 2 dargestellt, stimmen die charakteristischen Spitzen des aufgenommenen S21-Spektrums mit den Hauptschwingungsmoden in Abb. 1 gut überein, was auf maximale Transmission des elektrischen Signals bei der Resonanzfrequenz der Kugel hindeutet.

Deutlich höhere Gütefaktoren für die Sektor-Moden sollten durch weitere Verbesserungen im Design des Resonatoraufbaus erreicht werden. Elektromechanische Resonatoren der nächsten Generation mit Gütefaktoren von $Q \sim 10^5$ setzen erstens das Wachstum von dickeren NCD-Schichten voraus, um die SSM auf die Diamanthülle zu begrenzen, und zweitens die Verringerung des Kugel-Elektrodenabstands auf 100 – 150 nm, um den Kopplungskoeffizienten zu steigern und die Systemimpedanz zu verringern. Darauf zielen laufende Projekte am Fraunhofer IAF in den nächsten Jahren ab.