



MEMS structures shrink RF frequency references

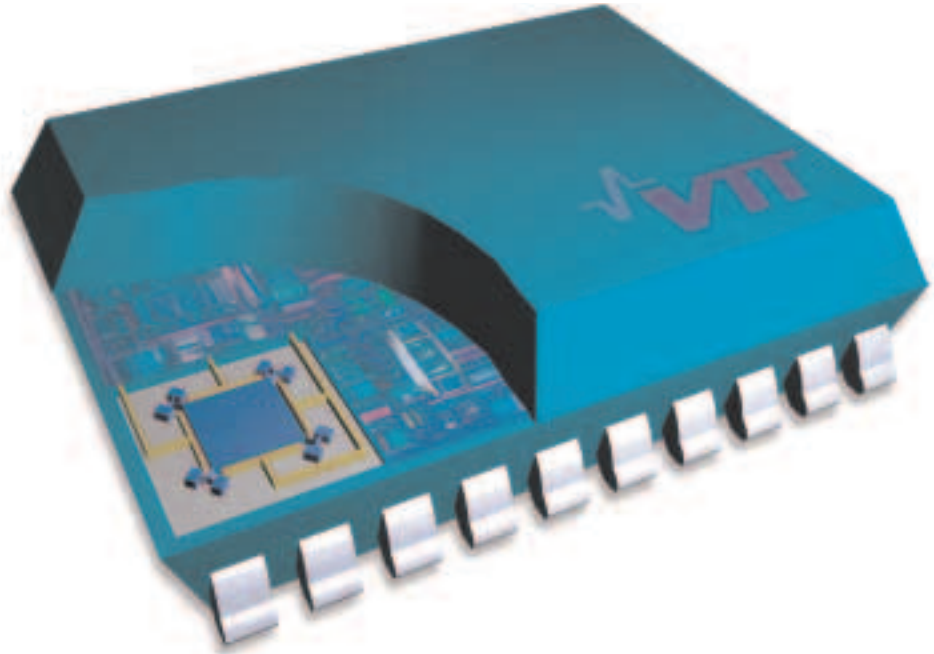
Using modern batch-processing techniques one can build silicon micromechanical structures suitable for frequency reference applications. The central advantage of such devices is their compact size and integrability as compared with the conventional quartz crystal-based reference oscillators.

Devices developed in the MEMRO project have demonstrated feasibility for excellent phase noise performance and long-term stability. For commercialization the central challenge of the micro-oscillator technology is developing a cost-effective solution for vacuum packaging and integration with rf-circuitry.

Also the compensation of the large temperature-dependence of the resonance frequency and the generation of the high DC-voltage for electromechanical coupling require tailored solutions. These technical development challenges are counterweighted by the huge potential in creating miniaturized frequency references for future rf-circuits.

The MEMRO project is part of Tekes PRESTO program. Contact person for the project is Tomi Mattila (tomi.mattila@vtt.fi).

MEMS kutistaa RF-referenssit



Modernien prosessointimenetelmien avulla piistä voidaan valmistaa mikrokokoisia mekaanisia rakenteita. Ne mahdollistavat integroitua elektroniikkaa tukevien komponenttien toteuttamisen mikrokoossa. Tärkeimpiä sovel-luskohteita ovat aika- ja taajuusreferenssit.

gahertsin signaalin, jonka perusteella yhteys tukiasemaan kyetään luomaan tarkalleen sovitulla taajuudella ja valitun kommunikaatiokanavan signaali-kohtaisuus saadaan hyväksi.

Kiteet ongelmana

Perinteisen kvartsiteknologian suurin ongelma on kiteen suuri koko, jolloin sitä ei voi integroida samalle piisirulle elektroniikan kanssa. Uusimpien radioiden piirikorteissa ei-integroitavat analogiset komponentit ovatkin suurin pullonkaula radion edelleen miniaturisoinnille.

Modernit vastaanotinarkkitehtuurit pyrkivät korvaamaan mahdollisimman monta analogista komponenttia digitaalisella signaalinkäsittelyllä, mutta kaikki nähtävillä olevat ratkaisut tarvitsevat taajuusreferenssin. Esimerkiksi uusissa Bluetooth-piireissä kaikki toiminnot ulkoista kvartsikidettä lukuun ottamatta on integroitu yhdelle CMOS-piirille.

Mainio pii

Uusimpien tutkimustulosten valossa mikromekaanisilla piivä-rähtelijöillä on mahdollista korvata perinteiset kvartsikiteet. Materiaalinahan pii on hyvien sähköisten ominaisuuksiensa ansiosta koko nykyisen elektroniikkateollisuuden perusta.

Pii on myös mekaanisesti erinomainen materiaali. Se on hyvin stabiili aine, jolla on suuri murto-lujuus, pienet sisäiset häviöt ja suuri kimmomoduuli. Näiden ominaisuuksien osalta puhdas pii muistuttaakin paljon kvartsi eli piidioksidia.

Yksi piipohjaisen mikromekaanikan tärkeimpiä etuja on se, että valmistuksessa voidaan suu-relta osin hyödyntää olemassa olevaa integroitujen piirien piikiekkotasoisista massavalmistustekniikkaa.

Oskillaattori SOI-kiekkolle VTT:n ja TKK:n MEMRO-hank-

keessa (Micro Electro Mechanical Reference Oscillator) on kehitetty mikromekaanisen referenssioskillaattorin prototyyppiä, joista yksi on esitetty oheisessa elektronimikroskooppilla otetussa valokuvassa. Tämä neliömoodiresonaattori on valmistettu SOI-kiekkon (Silicon-On-Insulator) 10 mikrometrin vahvuiseen piikerrokseen syväetsaamalla. Resonaattorin sivun pituus on 320 µm ja koko näin vähintään kertaluokkaa tyyppillistä kvartsikidettä pienempi.

Päävärähtelymoodia voidaan kuvata neliön vuoroittaisena kutistumisena ja laajentumisena. Resonanssitaajuus määräytyy suoraan äänen etenemisnopeudesta piissä (noin 8,5 km/s) ja se on tälle rakenteelle noin 13 megahertsia.

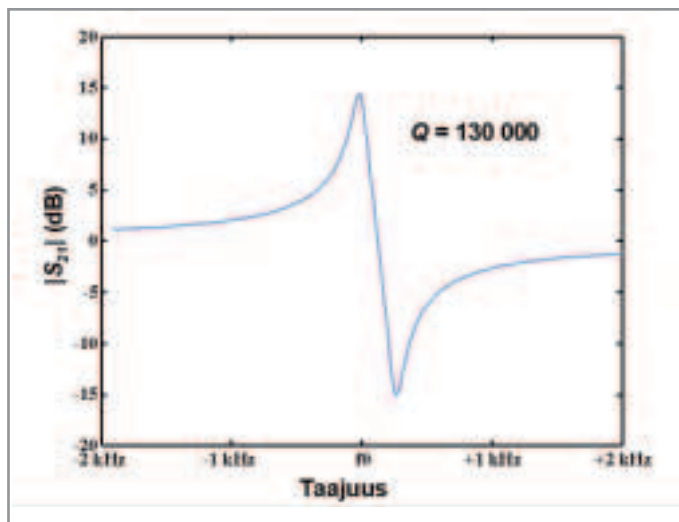
Koska puhdas pii ei ole kvartsin tapaan pietso-sähköinen materiaali, sähköinen kytkäytyminen mekaaniseen liikkeeseen ei onnistu suoralla vaihtojänniteheräteellä. Prototyyppiresonaattorin tapauksessa sähkömekaaninen kytkentä on tehty elektrostaattisesti. Resonaattoria ympäröi ka-pea (alle 1 µm) ura, joka muodostaa jännitteen voimaksi muunta- van kapasitanssin.

Varsinaisen vaihtuvajännitteisen signaalin lisäksi uran yli vaikuttaa tasajännite. Sähköstaattinen voima on signaalitaajuudella

Tomi Mattila, Ville Kaajakari, Aarne Oja ja Heikki Seppä

Perinteinen ratkaisu kello-signaalin tuottamiseksi on kvartsikide. Kvartsi-resonaattorin mekaanisen värähtelyn pitkän ajan stabiilius on erinomainen – kellokäytössä alle sekunnin virhe kuukaudessa on tavanomainen. Kvartsi-resonaattorin suuri hyvyysluku (yli 100 000) mahdollistaa myös spektriltään puhtaan signaalin, mikä on tärkeää pienikohinaisen kantoaaltotaajuuden aikaansaamiseksi radioissa.

Esimerkiksi GSM-puhelimessa kvartsikiteeseen perustuva referenssioskillaattori tuottaa 13 me-



Neliömodiresonaattorista mitattu resonanssikäyrä, joka osoittaa hyvyytlukuksi 130 000.

The frequency response of the square-extensional mode resonator. The extracted quality factor is $Q = 130\,000$.

tällöin verrannollinen vaihto- ja tasajännitteiden tuloon.

Hyvyytluku 130 000

Neliömodiresonaattorille mitattu resonanssikäyrä osoittaa, että komponentilla on korkea hyvyytluku ($Q\ 3D = 130\,000$). Se on samaa suuruusluokkaa kuin kvartsiresonaattoreilla.

Resonaattorin hyvä taajuuslektiivisyys on välttämätöntä pienikohinaisen oskillaattorin tekemiseen. Oskillaattorin suorituskyvyn kannalta on tärkeää myös riittävän mekaanisen energian varastointi värähtelijään.

Mittauksin on voitu osoittaa, että kuvatun kaltaiseen piiresonaattoriin varastoitavissa oleva värähtelyenergiatiheys on vähintään kaksi kertaluokkaa suurempi kuin kvartsiin. Tämä on merkittävä etu, koska mikrorakenteen pieni absoluuttinen koko rajoittaa varastoitavan energian määrää.

Kohinat kuriin

MEMRO-hankkeessa tehty työ on osoittanut, että mikromekaanikalla voidaan todellakin toteuttaa erittäin suorituskykyisiä oskillaattoreita. Neliömodiresonaattorin perustuvan oskillaattorin vaihekohinäkäyrästä nähdään,

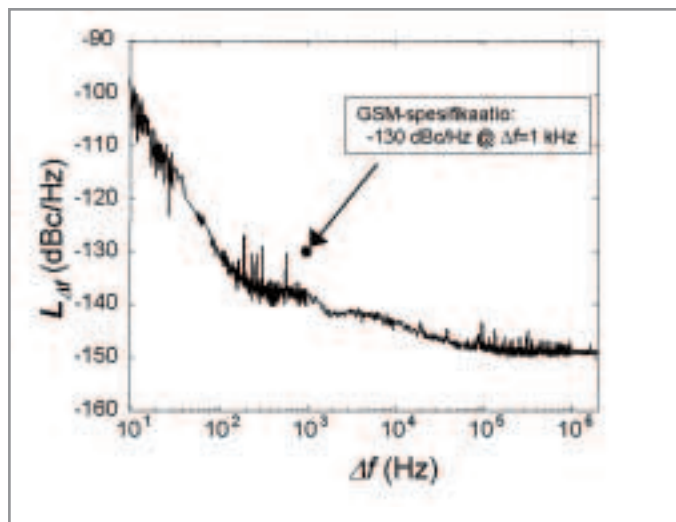
että oskillaattori täyttää tiukan GSM-spesifikaation vaatimukset ja on myös toistaiseksi paras mikromekaaniselle oskillaattorille julkaistu tulos.

Hyvä pitkän ajan stabiilius on pienen vaihekohinan ohella referensioskillaattorin keskeinen ominaisuus. Mikrorakenteiden stabiiliuden kannalta niiden keskeinen haaste on suuri pinta-ala verrattuna tilavuuteen: fyysisen kappaleen kokoa pienennettäessä sen pinta-alan suhde tilavuuteen kasvaa. Tämän vuoksi mikroresonaattori on periaatteessa alttiimpi esimerkiksi pinnan likaantumisen kuin kertaluokkaa suurempi kvartsikide.

Tämä asettaa tarkat vaatimukset mikrorakenteen valmistusprosessille ja erityisesti sen hermeettiselle paketoinnille. Noin 10 MHz ominaistajuudella toimivalle mikroresonaattorille vaaditaan lisäksi alle yhden millibarin tyhjiä ilman aiheuttaman väimmeyden poistamiseksi.

Taajuussiirtymä alle 1 ppm

Hankkeessa tehdyissä koesuljennoissa komponenteille on kyetty saavuttamaan varsin lupaava stabiiliisuus, sillä taajuussiirtymä on alle yksi ppm kuukauden mitausjakson aikana.

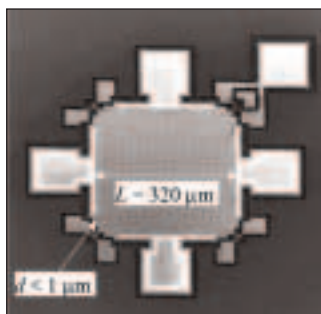


Prototyypioskillaattorille mitattu vaihekohina, joka täyttää helposti esimerkiksi GSM-taajuusreferenssin spesifikaation.

The phase noise measured from the prototype oscillator. The performance easily meets the typical GSM specification.

Mikro-oskillaattorien kaupallistumisen kannalta tärkeää on riittävän halpa tyhjöpaketointi ja integrointi mikropiirien osaksi. Myös piiresonaattorin ominaistajuuden suuren lämpötilariippuvuuden kompensointi sekä kytkentään tarvittavan suuren tasajännitteen luominen vaativat erikoisratkaisuja.

Vaativan kehitystyön vastapainona mikro-oskillaattoreilla on suuri potentiaali vastata moniin tulevaisuuden langattomien sovellusten haasteisiin luomalla mikrokokoinen taajuusreferenssi radiotaajuuspiirien osaksi. ■

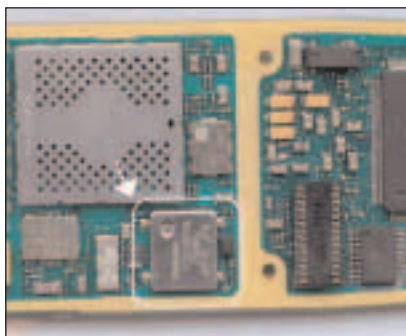


Elektronimikroskooppikuva MEMRO-projektissa kehitetystä mikromekaanisesta neliömodiresonaattorista, jonka resonanssitaajuus on noin 13 megahertsiä. Resonaattorin koko on $320\ \mu\text{m} \times 320\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$. Sähkömekaaninen kytkentä tehdään sähköstaattisesti käyttäen resonattorin jokaisella sivulla olevaa kiinteää elektroodia, jotka on erotettu resonattoriosasta kapealla uralla ($d < 1\ \mu\text{m}$).

Scanning electron microscope view of the micromechanical square-extensional mode resonator developed in the MEMRO-project. The resonance frequency is 13 MHz at the size $320\ \mu\text{m} \times 320\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$. The electromechanical coupling is done electrostatically using a narrow gap ($d < 1\ \mu\text{m}$) between the resonator and the fixed electrodes on each side.

GSM-puhelimen piirikortilla kvartsikiteeseen perustuva perinteinen referensioskillaattori on suurikokoinen ja vaikea integroida elektronikan yhteyteen.

The quartz reference oscillator on a GSM-phone circuit board appears bulky and difficult to be integrated with electronics.



Aiheesta enemmän:

Projektin sivut: www.vtt.fi/te/tutkimus/te7/tutkimus/mrfo/

[1] V. Kaajakari, T. Mattila, A. Oja, J. Kiihamäki, H. Kattelus, M. Koskenvuori, P. Rantakari, I. Tittonen, and H. Seppä, "Square-extensional mode single-crystal silicon micromechanical RF-resonator", Transducers'03, The 12th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Boston, USA, June 8-12, 2003, Pages: 425-432.

[2] T. Mattila, J. Kiihamäki, T. Lamminmäki, O. Jaakkola, P. Rantakari, A. Oja, H. Seppä, H. Kattelus, and I. Tittonen, "A 12 MHz micromechanical bulk acoustic mode oscillator", Sensors and Actuators A: Physical, Volume 101, Issues 1-2, 30 September 2002, Pages: 1-9.

[3] V. Kaajakari, T. Mattila, J. Kiihamäki, H. Kattelus, A. Oja, and H. Seppä, "Nonlinearities in single-crystal silicon micromechanical resonators", Transducers'03, The 12th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Boston, USA, June 8-12, 2003, Pages: 1574-1577.

Taustat

Kirjoittajat: Tomi Mattila, Ville Kaajakari, Aarne Oja, ja Heikki Seppä, VTT Tietotekniikka, Espoo.

Yhteysthenkilö: tomi.mattila@vtt.fi

Tutkimus: MEMRO

Yhteistyössä: VTT Tietotekniikka, Teknillinen korkeakoulu, Nokia, STMicroelectronics, Omketic ja VTI Technologies.

Tutkimusohjelma: PRESTO (Tekes)