

A folyamatműszerezés érzékelői

Energiaátalakulások szilárd testekben – 9.

Dr. Fock Károly

A mechanikai érzékelőket ismertető cikksorozat folytatásában néhány további alkalmazási példán keresztül szemléltetjük a mechanikai rezonátor típusú érzékelők alkalmazását nem is egyszerű elvi szerkezeti kialakítását és működési elvét. Fel kell hívni a figyelmet arra, hogy az elvi szerkezeti vázlatokat megvalósító érzékelők gyártástechnológiája általában a high-tech kategóriába tartozik, akár a klasszikus, fémből készült konstrukciókat, akár a korszerű félvezetőtechnológiát tekintjük.

Rezonátor típusú érzékelőkialakítások

Az 1. ábrán egy átfolyó rendszerű rezgő hengerrel működő sűrűségmérő látható (Solartron). A 2. a. ábra vázlata szerint az érzékelő egy vékony falú cső, amelynek elektromágneses gerjesztő-érzékelő rendszere a cső hosszának a közepén helyezkedik el. A mechanikai védelem céljából az érzékelőt – az ábrán nem jelölve – egy vastag falú csőbe építik be úgy, hogy az csak az egyik végén van fixen rögzítve, a másik vége a hőtágulás szempontjából szabad. (Hiszen ebben az esetben a hőtágulásból keletkező axiális erő a zavaró hatásként jelentkezik.)

A cső alakú mechanikai rezonátornak egy speciális alkalmazási esete a *Coriolis*-áramlásmérő 2. ábrán látható kialakítása.

Az érzékelő most – az előbbieknél vastagabb falvastagságú és az átmérőjéhez képest hosszabb – olyan egyenes csőszakasz, amelynek deformációja során nem a cső hossztengelelyére merőleges síkokban változik a cső keresztmetszetének az alakja, hanem áramláskor a *Coriolis*-erők miatt a cső tengelyvonala deformálódik. A csövet a 3. a. ábrán látható módon elektrodinamikusan közepén gerjesztik, és a tengelyre merőleges y irányú deformációját a cső hosszúságának $1/4$ - és $3/4$ -részében két optikai érzékelővel mérik (az l_1 - és l_2 -vel jelölt távolságoknál). Áramlásmentes állapotban a rezgetés hatására a cső az x - y síkban a 3. b. ábrán látható módon a felezősíkra merőlegesen szimmetrikusan deformálódik ($q_m=0$ -hoz tartozó görbe). Áramlás esetén azonban a *Coriolis*-erők hatására ez a szimmetria felborul, és a tengelyvonal a $q_m \neq 0$ -hoz tartozó görbe szerint fog megváltozni. Az

$$y_1(q_m) - y_2(q_m) = \Delta y(q_m)$$

deformációkülönbség a q_m lineáris függvénye, amelyet az optikai érzékelőkkel mérhetünk. A torzulást okozó *Coriolis*-erő keletkezését és a hatását a cső különböző rezgési fázisaiban és helyein a 3. c. ábra szemlélteti. A *Coriolis*-erő a cső hossztengelelye mentén folyamatosan változik, mivel a cső minden egyes elemi szakasza szögelfordulásának Ω , sebessége megközelítőleg a 3. d. ábrán látható módon alakul. Az ábra melletti levezetésből megállapítható, hogy ezzel az Ω szögsebességgel arányos a dF_c elemi *Coriolis*-erő is. Úgy képzelhetjük, hogy a cső deformációját a $dF_x(x) = 2q_m \Omega^2(x) dx$ megoszló terhelés szerint kell(ene) ki-

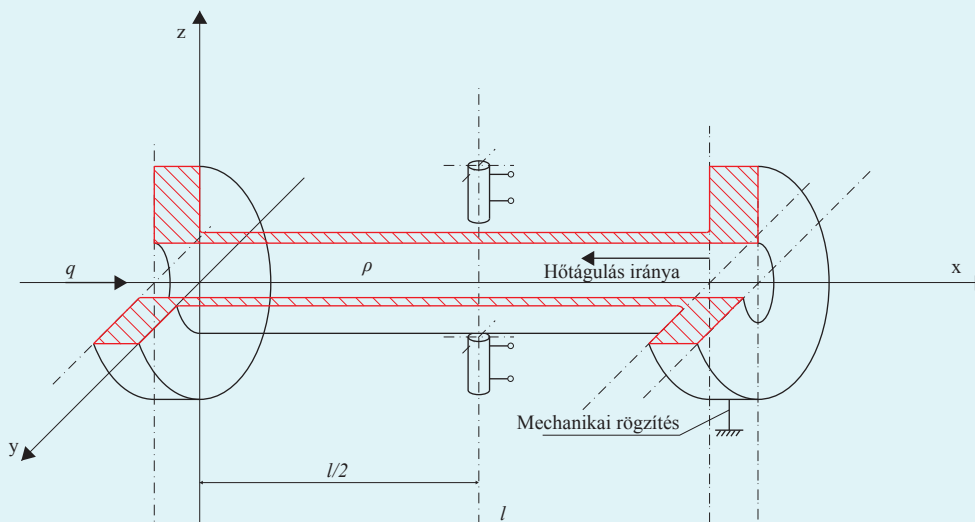
számítani. Ennek minden valószínűség szerint komoly elméleti akadálya és kevés gyakorlati jelentősége van. Mindezek ellenére a fentiekben ismertetett típus az áramlásmérő piacon megjelent *Coriolis*-áramlásmérők között a legegyszerűbb kialakítású, bár meg kell említeni azt a hátrányos tulajdonságát, hogy működése dinamikusan nem kiegyensúlyozott, ami gyorsabban vezet anyagkifáradási jelenségekhez, és ad gondot a technológus tervezőknek konstrukciós szempontból is. Minden bizonnyal az ikercsöves, ellenütemben működtetett rendszer sok szempontból kedvezőbb volna, amivel viszont az ismertetett konstrukció egyszerűségét veszítjük el.

A mechanikai rezonátorok elterjedésében az áttörést a mikroelektromechanikai technológiával Si-egy kristályból készített érzékelők jelentették. Tekintsünk meg ezekből néhány példát!

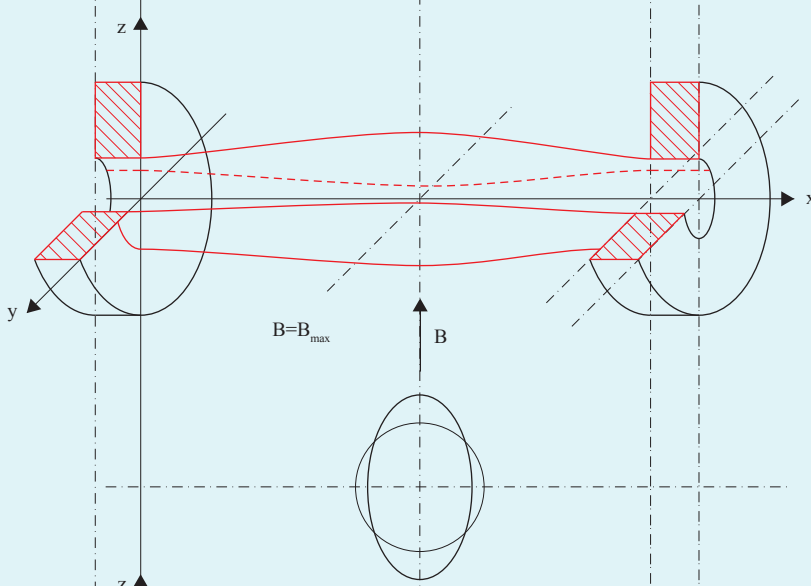
A nyomásmérők fejlesztése kiemelkedő helyet foglal el a mechanikai érzékelők kialakítása területén. A nehézséget ugyanis – mint azt már többször is említettük – az jelenti, hogy statikus, kvázistatikus nyomás mérésére közvetlenül villamos kimenőjelű érzékelőt alig ismerünk, a megoldás egy mechanikai kimenőjelű érzékelőhöz csatlakoztatott villamos kimenőjelű átalakítóból álló rendszer. Tehát olyan nyomásérzékelő konstrukciót kellett találni, amelyik jól alkalmazkodik a kristályos Si megmunkálásához, és egyszerűen lehet hozzá villamos kimenőjelű érzékelőt konstruálni. Nyomásérzékelőként legjobban bevált a befogott peremű síkmembrán. Van mód arra, hogy magát a membránt hozzuk rezgésbe, és mérjük a rezgési frekvencia nyomásfüggését. Ennek a megoldásnak az a hibája – amit az elméleti vizsgálatok és a kísérletek is alátámasztottak –, hogy a membrán rezgését befolyásolja a membránt körülvevő, mérendő közeg sűrűsége és a hőmérséklet is. Kedvezőbbnek tűntek azok a megoldások, amelyeknél a membrán deformációját érzékeli egy – vagy inkább több – vákuumban működő rezonátor. A konstrukció nem egyszerű, de a technológia az ilyen kialakítást is lehetővé teszi. A 3. ábrán látható nyomásmérő érzékelője pl. egy körgyűrű alakú membrán¹. A méréshatár 1000 Pa, a membrán R_k -jelű külső sugara 600 μm , R_b -jelű belső sugara 300 μm , a membrán h vastagsága 3 μm . Nyomáskülönbség hatására a membrán a sugár mentén S alakban deformálódik, amelyet az

1 H. A. C. Tilmans – S. Bouwstra: A novel design of a highly sensitive low differential-pressure sensor using built-in resonant strain gauges, *Journal Micromech. Microeng.* 3 (1993) 198-202.

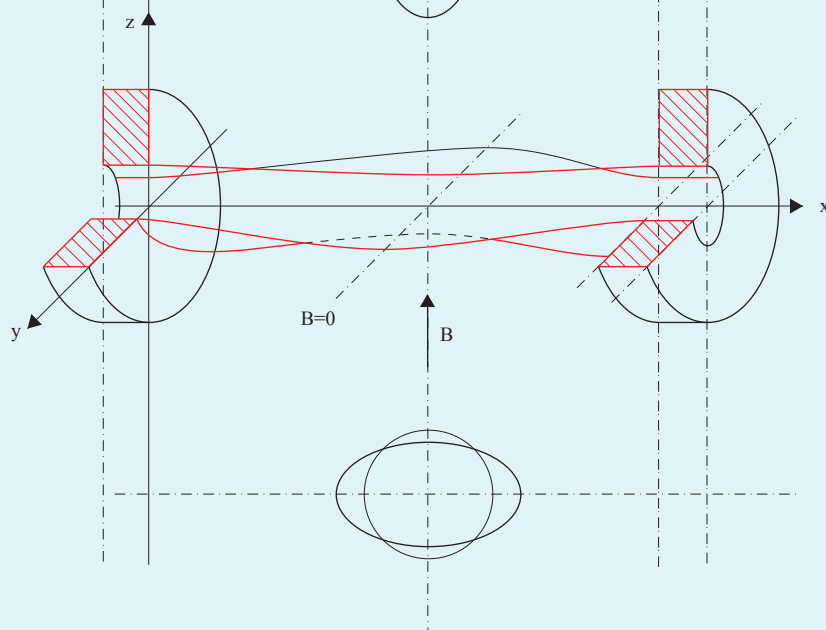
a.



b.

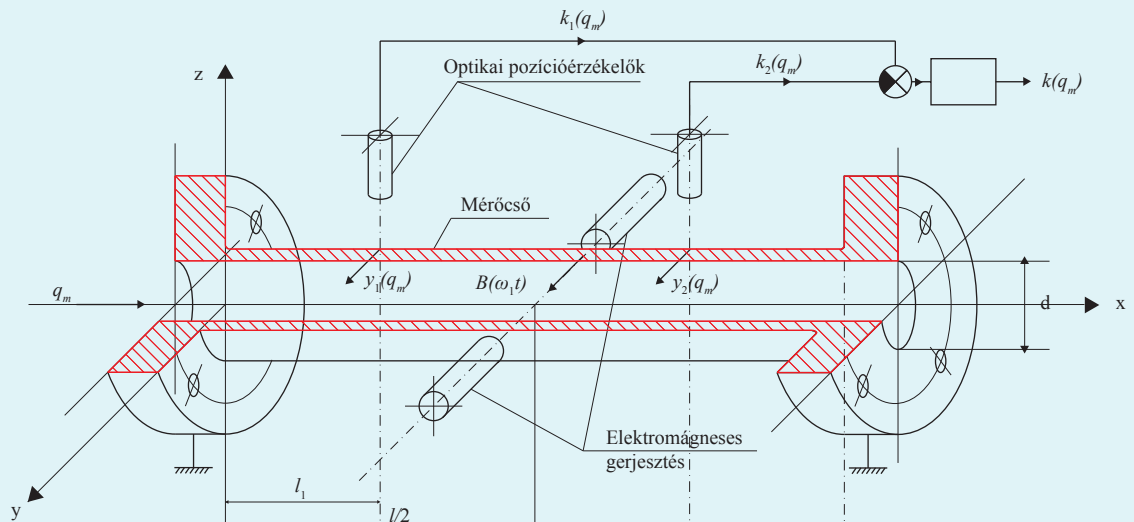


c.

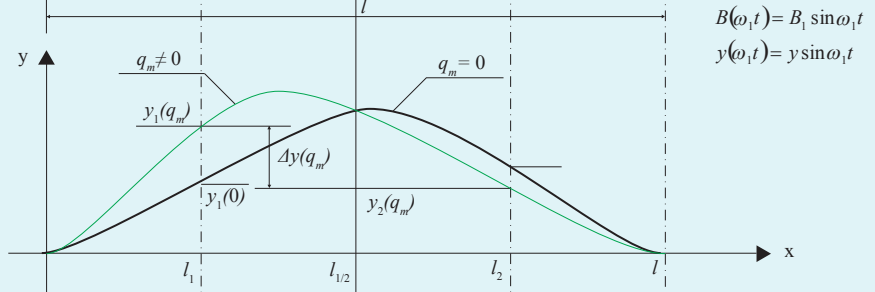


1. ábra Átfolyó rendszerű, rezgőhengeres sűrűségmérő
 a) Az érzékelőrendszer elvi szerkezeti felépítése
 b) A rezgőhenger deformációja maximális gerjesztéskor
 c) A rezgőhenger deformációja a gerjesztés megszűnése után

a.



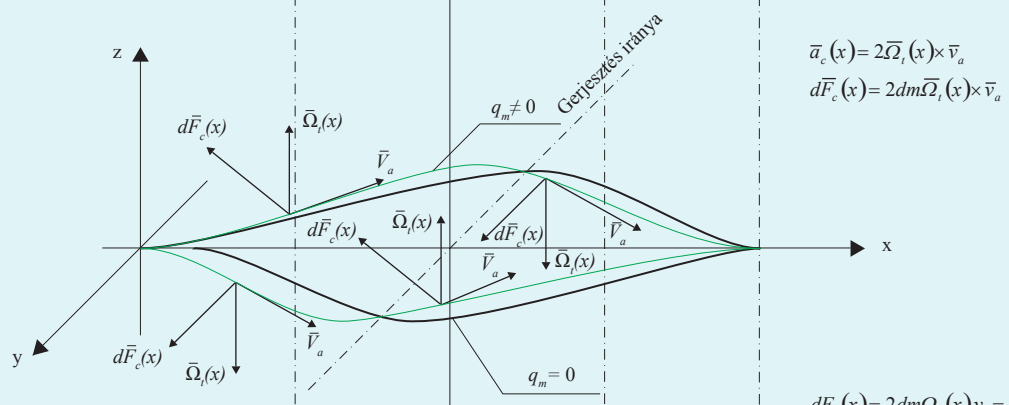
b.



$$B(\omega t) = B_1 \sin \omega_1 t$$

$$y(\omega_1 t) = y \sin \omega_1 t$$

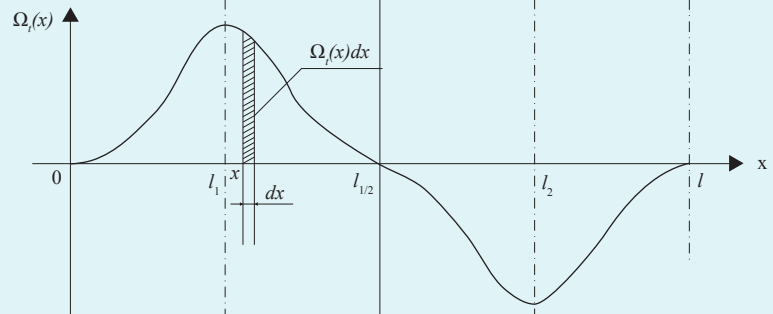
c.



$$\vec{a}_c(x) = 2\vec{\Omega}_l(x) \times \vec{v}_a$$

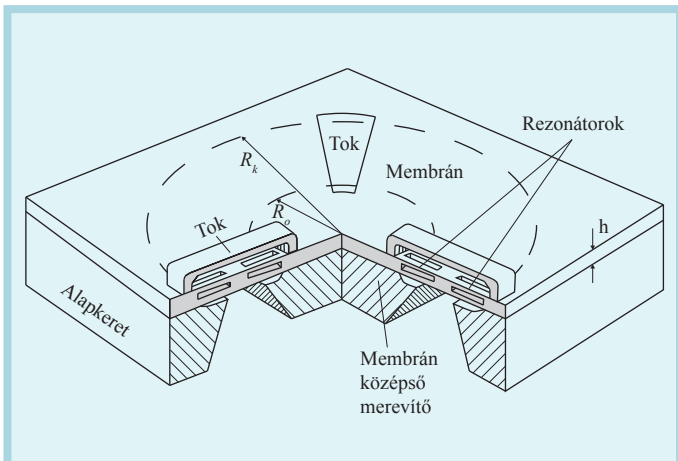
$$d\vec{F}_c(x) = 2dm\vec{\Omega}_l(x) \times \vec{v}_a$$

d.

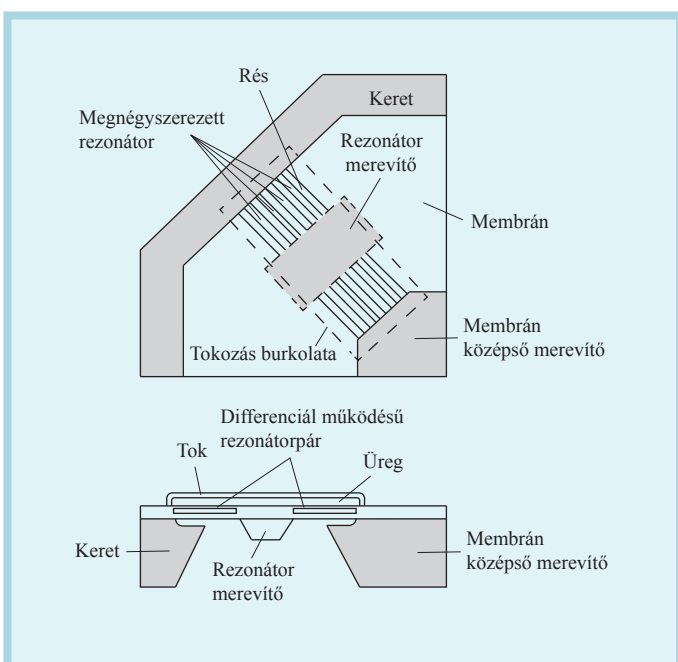


$$dF_c(x) = 2dm\Omega_l(x)v_a = 2dm\Omega_l(x)\frac{dx}{dt} = 2\frac{dm}{dt}\Omega_l(x)dx, \text{ ahol } v_a = \frac{dx}{dt} \text{ és } q_m = \frac{dm}{dt}$$

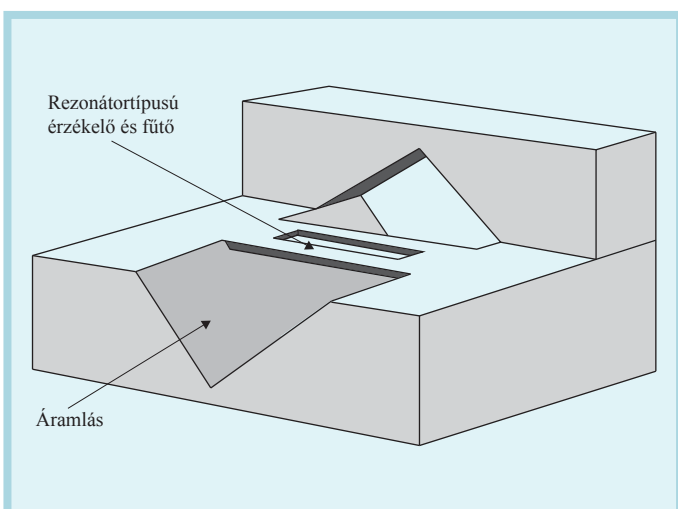
2. ábra Egycsöves Coriolis-áramlásmérő működési elve
 a) Elvi szerkezeti felépítés
 b) Cső tranzverzális deformációjának torzulása a tömegáram hatására
 c) Coriolis-erő által létrehozott alakváltozás szemléltetése
 d) Coriolis-gyorsulás tengelymenti változása (közelítés)



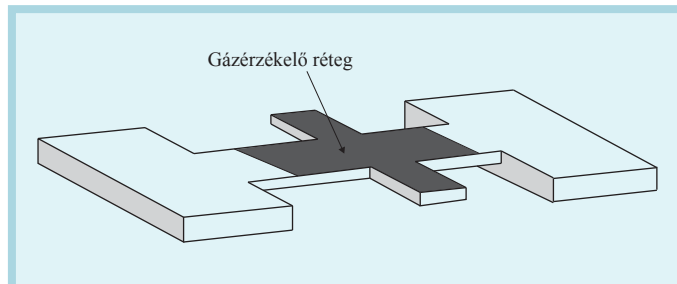
3. ábra Si-egykristályból készült membrános nyomáskülönbség-mérő rezonátor érzékelővel



4. ábra Csatolásmentesítés membrános nyomáskülönbség-mérő rezonátorérezékelőjében



5. ábra Rezonancia típusú tömegáramlás-mérő elvi szerkezeti felépítése



6. ábra Páratartalom érzékelő rezonátor típusú kialakításban gázérezkélő réteggel

ábrán látható módon – a membrán anyagából kialakított – differenciálrezonátorok alakítanak át frekvenciává, ill. frekvenciakülönbséggé. A rezonátorok kialakításukat tekintve mindkét végükön befogott prizmatikus tartónak felelnek meg, amelyek rezgési viszonyaival az előző fejezetekben már részletesen foglalkoztunk. Jelen esetben problémát az azonos átmérőn elhelyezkedő rezonátorok csatolása jelenti az egymással közvetlenül, ill. a keresztirányban lévőkkel a membránon keresztül közvetlen. Ezt elkerülendő az érzékelőt a 4. ábrán vázolt módon alakították ki, amelynek lényege: a rezonátorok egymás közötti áthallását a rajtuk elhelyezett merevítő gátolja, a membránon keresztül érvényesülő egymásra hatást pedig úgy szüntetik meg, hogy minden egyes rezgőelemet megnégyszereznek, és a rezonátorok közül kettőt-kettőt ellenütemben rezgetnek, más kifejezéssel élve a rendszert dinamikusan kiegyensúlyozzák. Mindkét ábrán látható a rezonátorokat befedő tok, amelynek üregében $\approx 0,1$ Pa nagyságú vákuumot állítottak elő, kiküszöbölve ezzel gyakorlatilag a rezgési frekvencia sűrűségfüggését.

Az 5. ábrán egy rezonanciátípusú tömegárammérő elvi szerkezeti felépítése látható². A mindkét végén befogott prizmatikus tartóként kialakított rezonátor egy V alakú áramlási csatornában helyezkedik el az ábrán látható módon. A tartón kialakított polyszilícium-érzékelők a termikus gerjesztésre és a piezorezisztív érzékelésre készültek. A gázáramlás konvektív hőátadás útján megváltoztatja (lecsökkenti) a fűtött tartó hőmérsékletét, a rezonátor mechanikai feszültsége viszont hőmérsékletfüggő, aminek eredményeképpen áramlásfüggő frekvenciaváltozást kapunk. Az ismertetett megoldás jó példája annak, hogy a zavaró hatásként megismert hőmérsékletfüggést hogyan lehet hasznosan felhasználni.

Zavaró hatásként értékeltük az érzékelőt körülvevő gáz jelenlétét is, ami azonban a következő példában (6. ábra) hasznos mérési módszer kidolgozását teszi lehetővé. Az ábrán egy rezonanciátípusú páratartalom-mérő érzékelőjét láthatjuk³. Az érzékelő polyszilíciumból készített rezonátorból áll, amelynek a felületére polimer adszorbeáló réteget alakítottak ki. Az adszorbeált gázösszetevő a tömegváltozás miatt a rezonanciafrekvencia megváltozását idézi elő.

A folytatásban további példákat láthatunk a félvezető alapanyagú, rezonanciátípusú érzékelőkre, majd a téma lezárásaként a felületi hullámterjedés mérés technikai alkalmazását tárgyaljuk.

editor@magyar-elektronika.hu

2 S. Bouwstra – R. Legtenbeg – H. A. C. Tilmans – M. Elwenspoek: Resonating microbridge mass flow sensor, Sensors and Actuators A21-A23 (1990) 332-335.

3 R. T. Howe – R. S. Muller: Resonant-microbridge vapor sensor, IEEE Trans. Electron. Devices ED-33 (1986) 499-506.