



MIKROELEKTRONIKAI ÉRZÉKELŐK I

Dr. Pődör Bálint

BMF KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet
és
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet

5. ELŐADÁS: KÉMIAI ÉRZÉKELŐK

2008/2009 tanév 1. félév

1

5. ELŐADÁS: KÉMIAI ÉRZÉKELŐK

1. Bevezetés: kémiai érzékelők jelentősége és alkalmazási területei.
2. Kémiai érzékelők fontosabb típusai, érzékelési mechanizmusok és folyamatok.
3. Ionszelektív érzékelők, pH érzékelés.
4. Tervezérlésű tranzisztor (FET) típusú érzékelők: ISFET, OGFET, Pd-gate FET.
5. Kvarc mikromérleg és AFH eszköz mint kémiai érzékelő.
6. Optikai és mikrohullámú spektroszkópai módszerek.
7. Nedvesség és páratartalom érzékelés.
8. Kémiai érzékelő mátrixok. Szagérzékelés és elektronikus orr. Ízérzékelés és elektronikus nyelv.

2

ALKALMAZÁSOK

Kémiai és biológiai érzékelők főbb alkalmazási területei

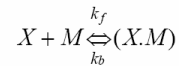
- Környezetmonitoring és védelem
- Folyamat ellenőrzés
- Élelmiszeranalitika
- Élettudományok
- Orvosi diagnosztika
- Veszélyes-, tiltott-, robbanó-, stb. anyagok indikálása

3

BIO(CEMICAL) SENSORS

‡ Basic definitions

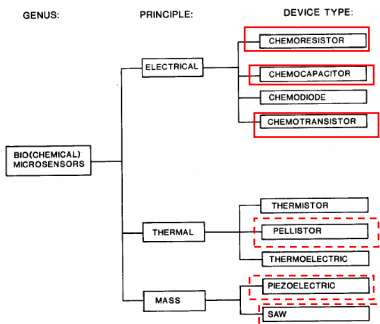
- (Bio)chemical signals \rightleftharpoons Electrical signals



- Change of heat - Calorimetric
- Change of charge - Conductometric / Amperometric / Potentiometric

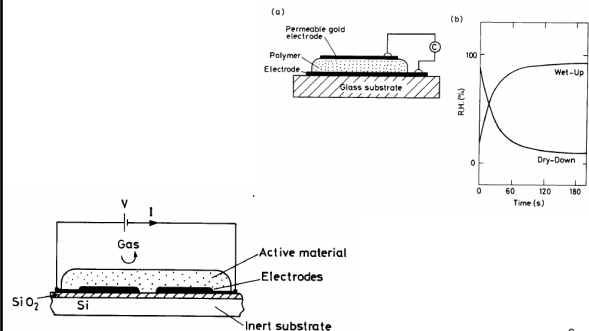
4

KÉMIAI ÉRZÉKELŐK CSOPORTOSÍTÁSA



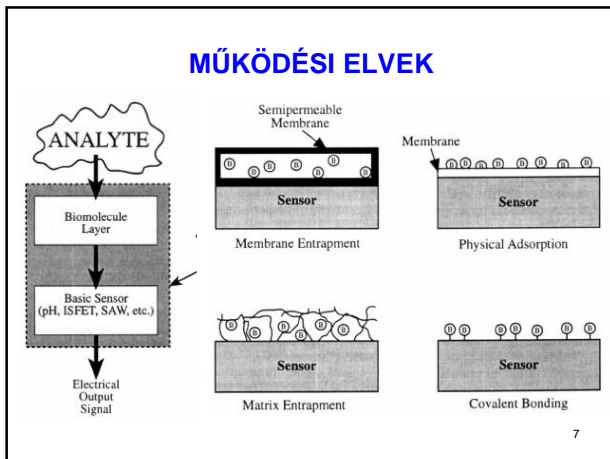
5

CHEMO- RESISTORS, CAPACITORS



6

MŰKÖDÉSI ELVEK



7

ION-SZELEKTÍV ÉRZÉKELŐK

Az ionszelektív érzékelők a folyadékok ionkoncentrációja meghatározására szolgálnak. Ennek fontos speciális esete a pH azaz a savasság/lúgosság mértékének meghatározása.

Mikroelektronikai kivitel: félvezető alapú, lényegében FET/MOSFET szerkezet. A vezérlőelektróda (gate) szerepét maga a mérendő folyadék játssza. Az érzékelési folyamat kihasználja azt, hogy a FET töltésvezérelt eszköz.

8

ION-SZELEKTÍV ÉRZÉKELŐK

FET típusú mikroelektronikai kémiai- (és gáz-) érzékelők:

ISFET	- ion-selective FET
OGFET	- oxide-gate FET
OSFET	- oxide-semiconductor FET
ADFET	- adsorption-FET
Pd-gate FET	- (GasFET)
ChemFET	- (Chemical FET)

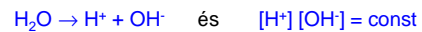
9

pH ÉRZÉKLEŐK

pH érték (hidrogénexponens, hidrogénkitevő) definíciója: pH - a szabad hidrogénionok (pontosabban hidrónium-ionok H_3O^+) koncentrációjának negatív logaritmus, azaz

$$pH = -\lg [H^+]$$

A pH értékek gyakorlati skálája $0 < pH < 14$, a víz disszociációs egyensúlyán alapul



Savas közeg (sok H^+)	$pH < 7$
Semleges közeg	$pH \approx 7$
Lúgos közeg (kevés H^+)	$pH > 7$

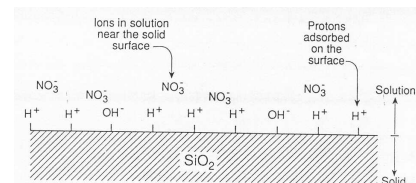
10

FET TÍPUSÚ KÉMIAI ÉRZÉKELŐK

Az érzékelő aktív felületén az oldatban lévő ionok megkötődnek. Savas közegben pl. a felületen a pozitív ionok lesznek többségben, és az oldatban ezt kompenzáló a felület felett egy a negatív ionokból álló réteg alakul ki. Ez így létrejött elektromos kettősréteg potenciálját (Nernst-potenciálját) érzékeli a FET eszköz. Pl. erős salétromsav (HNO_3) esetén túlnyomórészt H^+ ionok kötődnek meg a felületen, ezek pozitív töltését az oldatbéli negatív ionok (NO_3^-) a felülethez vonzódnak, és egy negatív töltésű réteget hoznak létre a pozitív töltésű felület felett.

11

ELEKTROMOS KETTŐSRÉTEG KIALAKULÁSI MECHANIZMUSA



Az elektromos kettősréteg és a Ψ_N Nernst-potenciál kialakulása SiO_2 felületén erős salétromsav (HNO_3) hatására. Savas közegben túlnyomórészt H^+ ionok kötődnek meg a felületen, ezek pozitív töltését leárnyékolandó az oldatbéli negatív ionok (NO_3^-) a felülethez vonzódnak, kialakítva az elektromos kettősréteget.

12

FET TÍPUSÚ KÉMIAI ÉRZÉKELŐK

A Nernst potenciál

$$\Psi_N = \ln 10 \times kT/q \Delta pH = \ln 10 \times U_{th} \Delta pH$$

Egységnyi pH változás ideális esetben $\ln 10 \times 26 \text{ mV} \approx 59 \text{ mV}$ elcsúszást eredményez az eszköz (ISFET) karakterisztikájában.

13

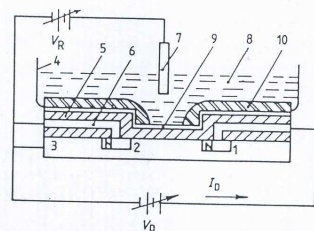
ISFET

A folyékony fázisban (elektrolitban) való mérésre szolgáló ISFET és egy hagyományos MOS tranzisztor között az a különbség, hogy hiányzik a gate-fémezés. Helyette a gate-oxid, illetve az oxidot borító ionszelektív réteg közvetlenül az oldattal érintkezik, az oldat potenciálját pedig referenciaelektroda (általában ezüst) rögzíti.

Az érzékelőréteg hidrogénion-érzékelők esetén leggyakrabban szilícium-nitrid, alumínium-oxid, és tantá-oxid alapú, de vannak más (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ , Ag^+ , Cl^- és Br^-) ionok szelektív meghatározására alkalmas más bevonatok is.

14

ION-SENSITIVE FET (ISFET)



Szilícium-nitrid érzékelőréteggel ellátott ISFET keresztmetszeti képe és mérési kapcsolása. 1 – nyelő, 2 – forrás, 3 – szubsztrát, 4 – tok, 5 – SiO_2 , 6 – Al fémezés, 7 – referencia elektróda, 8 - elektrolit 9 – Si_3N_4 , 10 - szigetelés

15

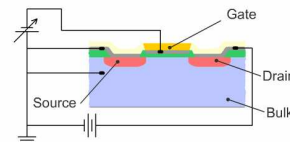
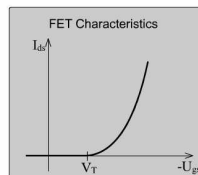
ION-SENSITIVE FET

Turn on or threshold voltage of the channel:

$$U_T = -\frac{Q_{ss} + Q_{ox}}{C_i} + 2\phi_{ms} + \phi_{ms}$$

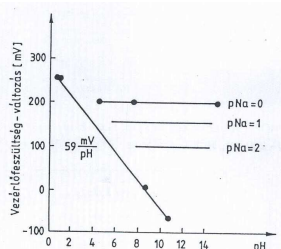
where:

ϕ_{ms} is the Fermi-potential of the bulk semiconductor
 ϕ_{ms} is the work function difference between the gate and the semiconductor
 Q_{ss} is the surface state and oxide charge per unit area
 Q_{ox} is the bulk charge per unit area in the depletion region



16

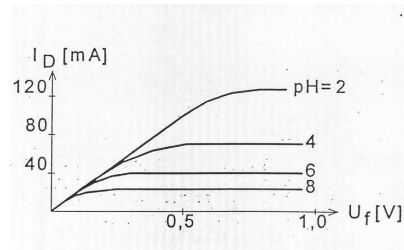
ISFET: pH- ÉS ION- (Na^+) ÉRZÉKELÉS



1. pH érzékelés $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ réteggel.
2. Na^+ ionok érzékelése alumínium-szilikát/ SiO_2 réteggel.
 A Na^+ ion érzékelés független az oldat pH értékétől, az ionérzékenység 55 mV/pNa .

17

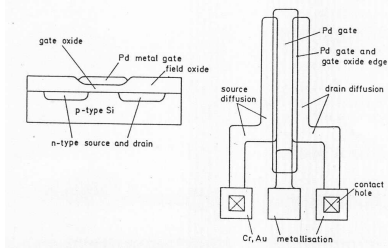
ISFET



ISFET jelleggörbéi pH mérés esetén

18

Pd-GATE MOS TRANSISTOR: HYDROGEN



Pd-gate MOSFET vázlatja.
Gate-oxid – 10 nm, fedő oxidréteg – 200 nm, vezető csatoma – 20 μm x 1000 μm.

19

Pd-GATE MOS TRANSISTOR: HYDROGEN

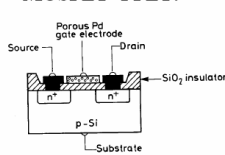
Hydrogen adsorbed on the metal gate as atomic hydrogen dissolves in the metal and diffuse to the metal-oxide interface where it gives rise to a dipole layer. The dipole layer changes the work function difference between the metal and semiconductor and thereby the threshold voltage of the MOS transistor. The threshold voltage change is easily measured.

$$\frac{1}{\Delta U_T} = C_1 p^{-1/2} + C_2$$

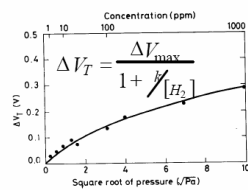
20

Pd-GATE MOS TRANSISTOR: HYDROGEN

MOSFET -PFET:



(Lundström 1975)



21

NEDVESSÉG-ÉS PÁRATARTALOM ÉRZÉKELŐK

A levegő nedvességtartalmának mérésére mind a hétköznapi életben mind a laboratóriumi klimatikus viszonyok megállapítása érdekében szükség van.

Hasonlóképpen szükség lehet bizonyos gázok, vagy szilárd halmazállapotú anyagok nedvességtartalmának meghatározására.

22

NEDVESSÉG-ÉS PÁRATARTALOM ÉRZÉKELŐK

1. Levegő nedvességtartalmának érzékelése és mérése.
2. Más gázok és szilárd anyagok nedvességtartalmának meghatározása.

23

PÁRATARTALOM MÉRÉSE

Gázelegy nedvességének/páratartalmának mértékegységei:

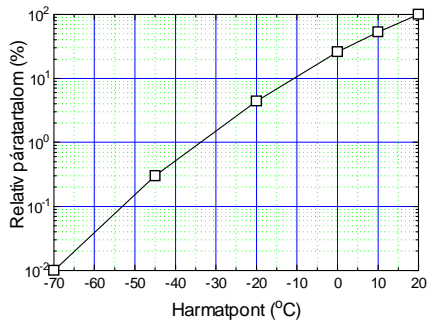
Abszolút pára- (vízgőz) tartalom: a vízgőz moláris aránya a gáz mennyiségéhez viszonyítva, (térfogat)ppm vagy mól%.

Relatív páratartalom: RH (relative humidity), a vízgőz parciális nyomása az adott hőmérsékleten érvényes telített gőznyomáshoz képest, %.

Harmatpont: az a **hőmérséklet**, melyen az adott gáz telítetté válik a vízgőzre. Ez alatt a vízgőz mint pára kicsapódik.

24

PSZICHROMETRIAI GÖRBE



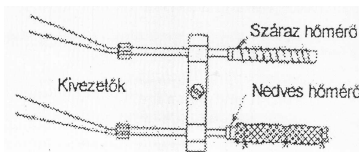
25

PÁRATARTALOM ÉS HARMATPONT ÉRZÉKELÉS

1. Pszichrometer (nedves-száraz hőmérős módszer), az elpárolgás okozta hőmérsékletcsökkenés mérése.
2. Fotodiódás harmat-pontérzékelő (diffúz reflexió), a víz kondenzációs hőmérsékletének mérése.
3. Kapacitív (interdigitális) harmat-pontérzékelő, a víz kondenzációs hőmérsékletének mérése.
4. Különbégi frekvencia mérése.
5. Kapacitív érzékelés, víz-elnyelő polimer vagy alumínium-oxid dielektrikum fémréteg fegyverzetek között.
6. Nedvességérzékelő IGFET (insulated gate FET).

26

PSZICHROMETRIAI NEDVESSÉGÉRZÉKELŐ



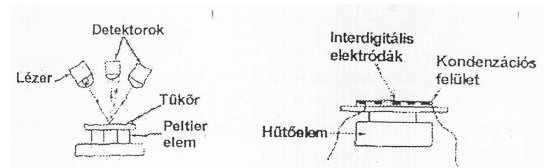
Két-hőmérős pszichrometriai nedvességérzékelő. A száraz hőmérő a referencia jelet adja, a nedves hőmérő a párolgás révén lehűl. A hőmérsékletkülönbségből a gázközeg páratartalma meghatározható.

$$p_{\text{viz}} = p_{\text{sat}} - \text{const} \times (T_{\text{száraz}} - T_{\text{nedves}})$$

Megvalósítása és üzemeltetése nehézkes.

27

HARMATPONT ÉRZÉKELŐK



Harmatpont-érzékelők elvi vázlata.

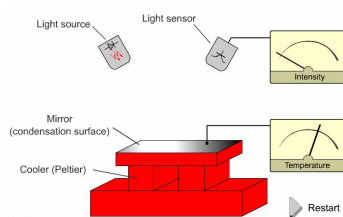
Baloldalt: párákicsapódás érzékelése optikai úton, a diffúz reflexió mérésével.

Jobboldalt: párákicsapódás érzékelése kapacitív változás mérésével.

Mindkét esetben Peltier hűtőelem és megfelelő elektronikus visszacsabályozás szolgál a harmatponti hőmérséklet beállítására.

28

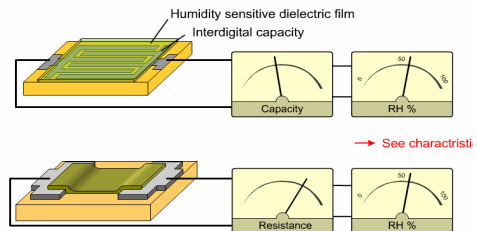
PHOTOELECTRIC DEW-POINT DETECTOR



The photoelectric mode is used most frequently for dew-point detection. The condensation surface is polished to mirror-quality reflectivity. A light beam is aimed at the mirror and one (or more) light sensors receive the light reflected from the mirror; condensation is accompanied by an abrupt change in the amount of light reflected to the sensor(s).

29

RELATIVE HUMIDITY SENSORS

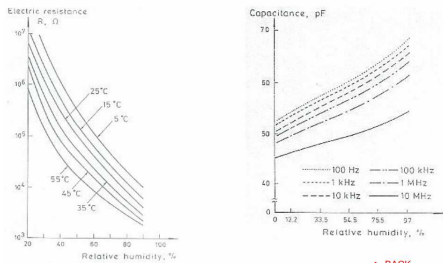


→ See charactristi

Dew-point (°C)	Relative humidity (%)	Absolute humidity concentration (ppm)
-75	0.002	-3
-45	0.3	70
-20	4.5	10 ³
0	25	6.1 · 10 ³
10	50	1.25 · 10 ⁴
20	100	2.34 · 10 ⁴

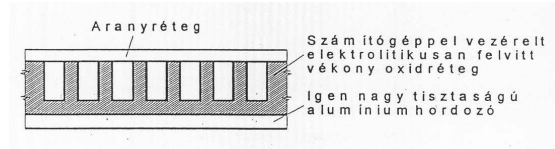
→ Dew-point sens 30

RELATIVE HUMIDITY SENSORS



31

KAPCITÍV NEDVESSÉGÉRZÉKELŐ

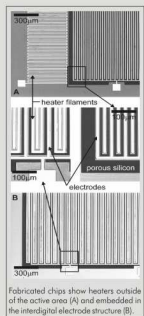


Alumínium-oxid szenzor aktív rétegének felépítése

32

Porous Silicon Based Humidity Sensor with Interdigital Electrodes and Internal Heaters

P. Fűrjes¹, A. Kovács¹, Cs. Dűcső¹, M. Ádám¹, B. Müller² and U. Mescheder²

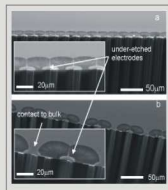


Realisation

- one side micromachining process
- porous silicon as sensitive layer (double layer)
- electrical contact to porous silicon via monocrystalline n-doped Si islands
- interdigital electrodes with embedded heater directly on porous Si surface (B)
- Al or Cr/Au interconnects

Influence of refresh heating

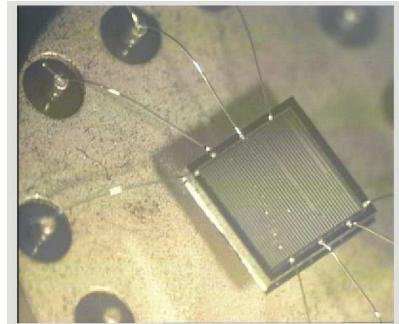
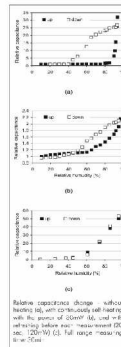
- without heating: extremely large hysteresis
- continuous heating: reduced hysteresis and sensitivity
- preset heating out: high sensitivity and nearly negligible hysteresis



SEM cross-sections of cleaved sensors. Both electrodes (a), or one of them (b) is under-etched.

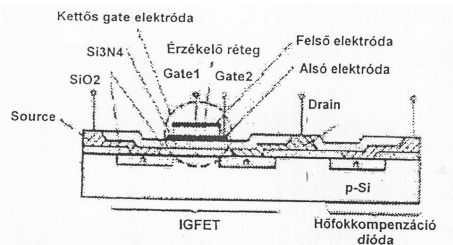
Fabricated chips show heaters outside of the active area (A) and embedded in the interdigital electrode structure (B).

35



34

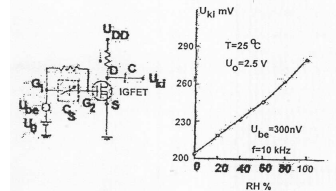
PÁRATARTALOM ÉRZÉKELŐ IGFET



Páratartalom érzékelő IGFET szerkezete. A felső elektróda porózus Au réteg.

35

PÁRATARTALOM ÉRZÉKELŐ IGFET



Páratartalom-érzékelő IGFET áramkörti modellje és karakterisztikája.

$$U_{ki} = \frac{U_{be} R_L g_m}{1 + C_i / C_s}$$

C_i – gate szigetelés kapacitása, C_s – nedvességre érzékeny kapacitás

36

NEDVESSÉGÉRZÉKELÉS: OPTIKA

Optikai spektroszkópia.

Az infravörös tartományban a vízmolekulák elnyelési sávokkal (pl. 1870 nm a közeli infravörös tartományban) rendelkeznek.

Egyszerű mérés/érzékelés valósítható meg megfelelő hullámhosszúságú fényt kibocsátó fénydióddal (LED) vagy lézerciódával (LD).

A módszer más gázok illetve gőzök kimutatására is alkalmas, a megfelelő elnyelési sávoknál elvégzett méréssel.

37

NEDVESSÉGÉRZÉKELÉS: OPTIKA

Optikai spektroszkópia.

Az infravörös tartományban a vízmolekulák elnyelési sávokkal (pl. 1870 nm a közeli infravörös tartományban) rendelkeznek. Egyszerű mérés/érzékelés valósítható meg megfelelő hullámhosszúságú fényt kibocsátó fénydióddal (LED) vagy lézerciódával (LD). A módszer más gázok illetve gőzök kimutatására is alkalmas, a megfelelő elnyelési sávoknál elvégzett méréssel.

38

NEDVESSÉGÉRZÉKELÉS: OPTIKA

Optikai spektroszkópia.

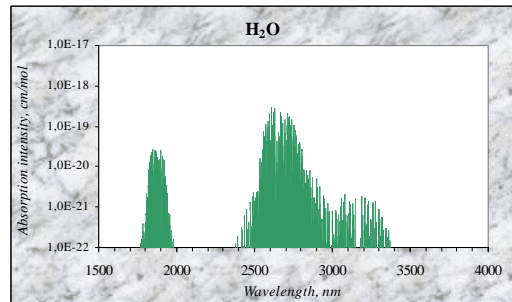
Félvezető fényforrások az infravörös tartományban

Félvezető **Hullámhossz (nm)**

GaAs LED, LD	830
InGaAsP/InP LED, LD	1100 - 1700
InGaAsSb/GaSb LED	1700 - 2400

39

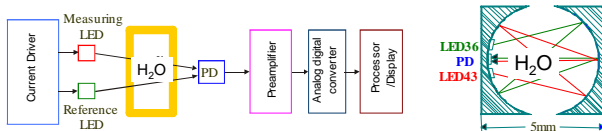
VÍZ ELNYELÉSI SPEKTRUMA



A víz elnyelési spektruma a közeli (NIR) és közepes (MIR) infravörös sugárzás tartományában.

40

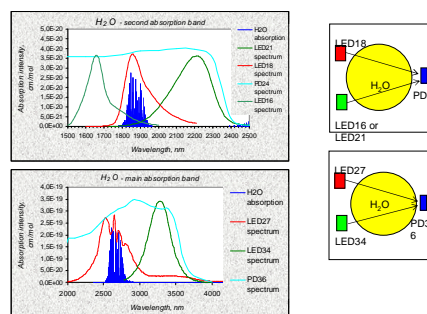
IR ABSZORPCIÓS MÉRÉS



41

Light Emitting Diodes and Detectors for H₂O Sensors

Water has very strong absorption band in the range 2550-2750 nm and second strong enough absorption band in the range 1830-1900 nm.



NEDVESSÉGÉRZÉKELÉS: MIKROHULLÁM

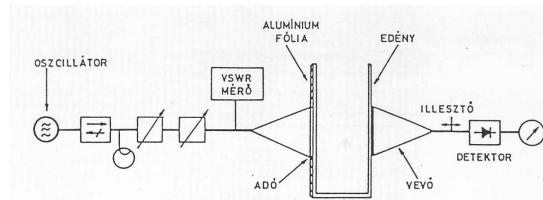
Mikrohullámú mérés.

A cm-es hullámhosszak tartományában (S-sáv 2,60-3,95 GHz, G-sáv 3,95-5,85 GHz, J-sáv 5,30-8,20 GHz és X-sáv 8,20-12,40 GHz) erős a víz elnyelése ($\alpha = 1-50 \text{ cm}^{-1}$).

Igen elterjedt a mikrohullámú abszorpciómérés alkalmazása különféle szilárd anyagok (nyersanyagok, félkész- és késztermékek) nedvességtartalmának érzékelésére és mérésére, akár folyamatos on-line üzemmódban.

43

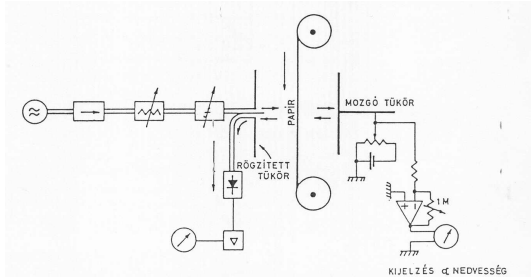
ANYAGOK NEDVESSÉGTARTALMÁNAK MÉRÉSE MIKROHULLÁMÚ MÓDSZERREL



Mérési elrendezés szemes/granulált anyagok nedvességtartalmának folyamatos mérésére (transzmisszió/fázistolás).

44

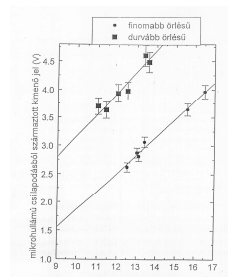
ANYAGOK NEDVESSÉGTARTALMÁNAK MÉRÉSE MIKROHULLÁMÚ MÓDSZERREL



Mérési elrendezés papír, textília, fa, farostlemez, stb. nedvességtartalmának folyamatos mérésére (reflexiós módszer).

45

NEDESSÉGMÉRÉS MIKROHULLÁMÚ ABSZORBCIÓVAL



Üveggyári homok nedvességtartalmának folyamatos (*on-line*) méréséhez szolgáló kalibrációs görbe (9,8 és 11,3 GHz).

46

VÉGE

47