



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
ELEKTRONIKAI TECHNOLÓGIA TANSZÉK

Papp Bence

# Pásztázó akusztikus mikroszkópia alkalmazása az elektronikai hibaanalitikában

Konzulens: Balogh Bálint

## Tartalomjegyzék

1. Bevezető.....	3
1.1 Néhány fontosabb elv az akusztikus vizsgálathoz[1].....	3
2. Alapvető mikroszkóp fajták [1].....	5
2.1 Pásztázó lézeres akusztikus mikroszkóp (SLAM).....	5
2.2 C módban pásztázó akusztikus mikroszkóp (C-SAM).....	5
3. Képzalkotási módok [1].....	6
3.1 A-mód.....	6
3.2 C mód.....	7
3.3 Réteghatár szkennelési technika.....	8
3.4 Tömb szkennelési technika.....	9
3.5 Transzmissziós mód.....	9
3.6 Hullám utazási idő (Time-of-Flight).....	10
3.7 B-mód.....	10
4. Lencsék [2].....	11
5. Hogyan kezdjük neki, és a kép készítése.....	14
6. Saját munka.....	19
7. A hanghullám és az elektromágneses hullám közti analógia [3],[4].....	26
8. Összefoglalás.....	32
9. Köszönetnyilvánítás.....	33
10. Irodalomjegyzék.....	34

## 1. Bevezető

Az elektronikai iparban előforduló termékek, alkatrészek hibáinak felderítésével és azok okának meghatározásával foglalkozik a hibaanalitikai laboratórium. A laboratórium eszközei abban segítik az ott dolgozó mérnököket, hogy megtalálják az eszköz valamely fizikai tulajdonságának megváltozását. Attól függően, hogy mely tulajdonságot szeretnénk vizsgálni, a mérnök feladata a megfelelő laboratóriumi berendezés kiválasztása. Így hát az eszközparknak olyan elemekből kell állnia, hogy azok egymást kiegészítsék, és lehetőleg sok fizikai anyagtulajdonság vizsgálatát tegyék lehetővé. Az optikai mikroszkóp, az alkatrész felületén lévő hibák felderítésére alkalmas. Ilyen hibák a repedés, törés, különböző forrasztási hibák. Ezen túlmenően, akármilyen vizsgálat is történt, a dokumentáció készítésénél elhagyhatatlan rész a fénykép. Olyan alkatrészeknél, mint például a BGA (Ball Grid Array), CSP (Chip Scale Package), flip chip, PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier) a forrasztási kötések vizsgálata is nehézkes, sőt általában lehetetlen lenne az optikai mikroszkóppal. Ha például azt ellenőrizzük, hogy a BGA megfelelően van-e felforrasztva a NYHL-re (Nyomtatott Huzalozású Lemez), ahhoz be kéne néznünk a lábai között, vagy át kéne tekintenünk az alkatrész testén. Ilyen esetekben nyújt megoldást a röntgenmikroszkópia. A röntgenes struktúra vizsgálattal roncsolás nélkül vizsgálhatók az optikai mikroszkóp elől elrejtett területek. Ilyenek az alkatrészek belső szerkezete, az előbb említett alkatrészek forrasztása, mikrohuzal kötések, fémezett furatok. Az idők folyamán az akusztikus mikroszkóp, SAM (Scanning Acoustic Microscope) is integrálódott a hibaanalitikai laboratórium eszközparkjába. Mi ennek az oka? Miben egészíti ki az eddigi, valamint az itt fel nem sorolt berendezéseket a SAM? Első közelítésben a röntgenmikroszkóphoz hasonlóan beléláthatunk az alkatrészbe. A különbség ott van, hogy mást látunk. Megláthatjuk az alkatrészekben jelenlévő, ultrahang szempontjából különböző rétegek határait, felderíthetjük e rétegek delaminációját, láthatjuk vele az anyagban lévő légzárványokat, repedéseket. Ezek például a röntgen mikroszkóppal nem feltétlenül láthatók. Például míg észrevehető vele légzárvány a forrasztásokban, addig nem veszi észre a műanyag tokozásban lévő légzárványokat. SAM segítségével ez detektálható. Ha azt szeretnénk megvizsgálni, hogy egy teljesítmény tranzisztortban a szilíciumlapka tökéletesen kontaktál-e a hő elvetetését szolgáló fémmel, azt a SAM segítségével megtehetjük. A SAM előnye ezeken túl, hogy működési elvéből adódóan a vizsgálat roncsolásmentes. Megjegyzem, hogy a megfelelő akusztikus csatolás érdekében a minta teljes egészét valamilyen folyadékba kel merítenünk. Ha az eszköz erre érzékeny, akkor a vizsgálat nem mondható roncsolás-mentesnek. Vannak olyan esetek, amikor a roncsolásos analízis elkerülhetetlen. Itt a SAM segítségünkre lehet valamilyen roncsolásos vizsgálat előkészítésében. Gyorsan fel tudjuk deríteni a céltárgy belső topológiáját, pontosan meg tudjuk határozni az anomáliás területeket, meg tudjuk állapítani, hogy hol lesz érdemes például a keresztcsiszolatot elkészíteni. Ezzel növeljük az átfogó vizsgálat összhatásfokát. Felhasználhatjuk akár egy gyorsított élettartam vizsgálat, ALTA (Accelerated Life Testing Analysis) során a céltárgy belső fizikai változásainak megfigyelésére. Manapság a SAM on-line alkalmazását az iparban korlátozza a magas ára, a képalkotás időigényessége, szerkezeti bonyolultsága (vizes csatolóközeg, mechanikus pásztázás), és hogy szükség van egy szakértő emberre, aki a képet kiértékeli, értelmezi.

Dolgozatomban bemutatok néhány fontosabb SAM típust, és képalkotási módot. Gyakori akusztikus lencsetípusokat is ismertetek, írok ezek előnyeiről, hátrányairól, összehasonlítom azokat egymással. Részletes leírását adom a pásztázó akusztikus mikroszkóppal történő vizsgálat teljes folyamatának. Közlök néhány általam is elvégzett vizsgálati eredményét. Rámutatok az elektromágneses hullám ideális távvezetéken történő terjedése, és a hanghullám terjedése közti analógiára.

### 1.1 Néhány fontosabb elv az akusztikus vizsgálatához[1]

Mivel levegőben és vákuumban az ultrahang nem terjed megfelelően, és így a képalkotásnál nem érhető el a megfelelő kontraszt, valamilyen közvetítő közeget kell alkalmazni a hangforrás és a

vizsgálati tárgy között. Erre alkalmas valamilyen folyadék (pl. víz), amiben az eszközt, illetve a transducer (hangforrás és/vagy detektálás eszköze) egy részét elmerítjük. A legtöbb elektronikában használt szilárd anyagban jól terjed a hang. A legfontosabb mostanában alkalmazott akusztikus mikroszkóp fajták a SLAM ( Scanning Laser Acoustic Microscope), és a C-SAM (C-mode Scanning Acoustic Microscope). Mindkettő nagyfrekvenciás hanghullámot alkalmaz, általában 10 MHz-től 200 MHz-ig. Nagyobb felbontás eléréséhez magasabb frekvenciás transducerek szükségesek. Viszont az ezek által kibocsátott hanghullámok segítségével viszonylag kis mélységekben tudunk vizsgálni a minta belsejében. A kisebb frekvenciás hullámok, bár segítségükkel gyengébb felbontású kép készíthető, könnyebben behatolnak a minta mélyebb rétegeibe, illetve olyan anyagoknál is alkalmazhatjuk őket, amiben nagyobb a hang csillapodása. Így hát kompromisszumot kell kötnünk, ha a vizsgálati terület az anyag mélyebb rétegeiben van, fel kell áldoznunk a jobb felbontást. A hanghullám terjedése nagyban függ attól, hogy milyen anyagban terjed. Egy adott vizsgálófrekvencián különböző anyagokba az ultrahang különböző mélységig hatol be. Az anyagok azon tulajdonsága alapján, hogy mennyire áttetszőek az ultrahangnak, a következő sorrend állapítható meg: polimerek, fémek, üveg, kerámiák, ahol a kerámia a legkönnyebben áthatolható a hang számára. Anyagok és a vizsgáló frekvencia szerint az 1. táblázatba rendeztem néhány jellemző maximális távolságot, melynek megfelelő mélységben képet tudunk készíteni. Az értékek természetesen közelítőek, nem veszik figyelembe a speciális eszköz-, és lencsekarakterisztikákat.

**1. táblázat.** Különböző anyagokban a láthatósági mélység milliméterben

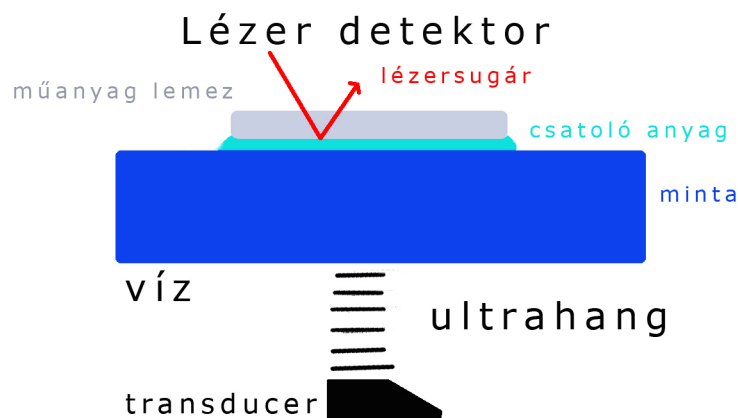
Anyag		100 MHz	30 MHz	10 MHz	
K e r á m i á k	Szilícium-nitrid	Forrón nyomott	25	75	250
		Szinterelt	5	15	50
	Szilícium-karbid	Tejesen tömör	25	75	250
		Öntött	3 .. 6	9 .. 18	30 .. 60
	Alumínium-oxid	Elektronikai felhaszn.	3 .. 6	9 .. 18	30 .. 60
		Tejesen tömör	10	30	100
F é m e k	Acél 4140-es típus:				
	Megeresztett		2	6	20
	Edzett		5	15	50
	Gyorsacél		3 .. 10	9 .. 30	30 .. 100
	Titán		10	30	100
	Alumínium		10	30	100
	Porított fémek		1 .. 10	3 .. 30	10 .. 100
	Wolfram-karbid		5	15	50
Kompozit  polimerek	Szálakkal párhuzamosan		0,25 .. 3	0,75 .. 8	2,5 .. 30
	Szálakra merőlegesen		0,1 .. 0,5	0,3 .. 1,5	1 .. 5
	Rendezetlen szálakkal		0,1 .. 0,5	0,3 .. 1,5	1 .. 5

## 2. Alapvető mikroszkóp fajták [1]

### 2.1 Pásztázó lézeres akusztikus mikroszkóp (SLAM)

Ez az eszköz transzmissziós, és árnyékképző technikát alkalmaz. A transzmisszió jelen esetben azt jelenti, hogy az ultrahang, amit a kép készítéshez segítségül hívunk, áthatol a közegen. Gondoljuk el, az analógiát az emberi látással. Mi emberek a fény segítségével vizsgáljuk a tárgyakat, és készítjük a képeket a fejünkben. Ha írásvetítővel vetítünk egy előadáson, eldönthetjük, hogy a fóliát alulról világítsuk meg, ez felel meg a transzmissziós eljárásnak, vagy fölülről és a fóliáról visszavert fény kerüljön a vászonra, ennek megfelelője a reflexiós eljárás (a későbbiekben szó lesz erről is). Az árnyékképzés nem más, mint mikor lámpával a falra világítunk, a fény útjába tesszük a kézfejünket, és ábrákat jelenítünk meg a falon. Ez a két módszer általában együtt jár.

Folyadékon keresztül a minta aljára folyamatos síkhullámot bocsátunk. A túoldalra megérkező hullámok alakját egy gyorsan pásztázó lézersugárral érzékeljük, pontról pontra, mint egy miniatűr mikrofonnal. A minta tetejére egy optikailag tükröző műanyag lapot kell elhelyezni. Az akusztikus kép erre vetül, és a lézer is ezen pásztáz végig. A készülék vázlatát az 1. ábra mutatja. Fontos, hogy a minta preparálásakor, és a készülékbe helyezéskor a hanghullám útjába ne kerüljön kellemetlen anyagi átmenet, például a műanyag lapot úgy kell felragasztani, hogy közte és a minta között ne legyen légrés, ami nagy veszteséget okozna. A mintán áthatoló hanghullám alakja módosul a minta anyagi tulajdonságai, és belső szerkezete szerint. Ez ad lehetőséget a kép készítésére. Anyagi hiányosságok, folytonossági hibák, légzárványok erősen beleszólnak a hullám áthaladásába, és így árnyékként válnak láthatóvá. A SLAM gyors, így alkalmas sok minta, illetve egy minta sok különböző területének vizsgálatára. Működési elvének köszönhetően egyszerre képes vizsgálni az említett anyagi hibákat a minta teljes térfogatában, hiszen ha csak egy rétegben hiba van, az rögtön árnyékot képez. Hátránya, hogy nem tudjuk meghatározni, hogy a hiba milyen mélyen található.



1. ábra. A SLAM (Scanning Laser Acoustic Microscope) sematikus felépítése

### 2.2 C módban pásztázó akusztikus mikroszkóp (C-SAM)

A C módban pásztázó akusztikus mikroszkóp elsősorban a reflexiós eljárást alkalmazza. Így készíthetünk képet a minta egy belső, adott rétegeről. A transducer váltakozva küldi a fókuszált hanghullámot a mintára, és fogadja a visszavert hullámokat. Reflexiók a hanghullám szempontjából különböző minőségű rétegek határain jönnek létre. Ez jelentheti akár a mintában normálisan jelen lévő műanyag tok és szilícium lapka határát, de azt is, hogy ha a műanyag öntvénybe légzárványok kerültek, akkor a műanyag levegő határát. A visszhangok időben elkülönülnek egymástól, attól függően, hogy a minta mely rétegeből származnak. Egy adott pontból vett hullámcsomag az összes reflexiót tartalmazza, ezért a képalkotáshoz egy elektronikus ablak segítségével kiválasztunk egy

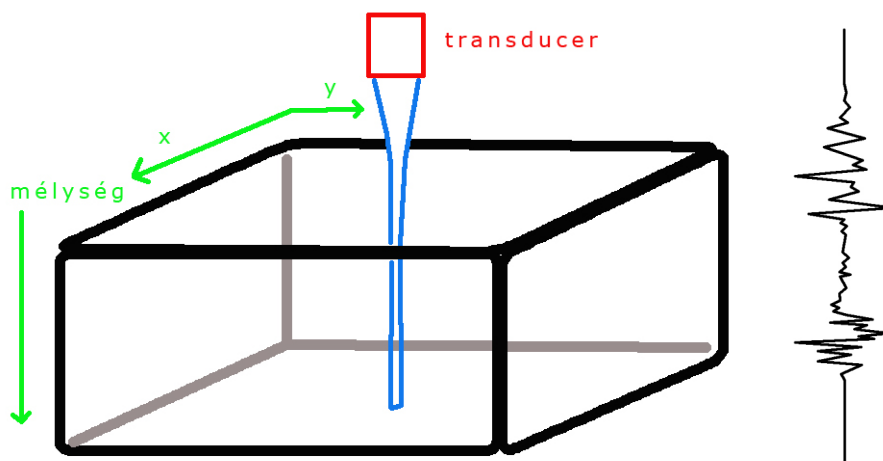
időszületet, amely intervallumban kíváncsiak vagyunk a hullám alakjára. Ezáltal történik meg a mélység specifikálása. Egy gyors, precíziós mechanika mozgatja a transducert a minta fölött, így megtörténik minden pontból a mintavételezés. A vett jelek átáramlanak egy számítógépbe, ami feldolgozza azokat, és így elkészül a kép. Annak ellenére, hogy a mozgató mechanika sebessége jóval kisebb, mint a SLAM-nél a lézersugár pásztázása, és ezért a kép is lassabban készül el, a C-SAM-nek is megvan a létjogosultsága olyan analíziseknél, ahol mélységspecifikus adatokra van szükségünk.

### 3. Képképzési módok [1]

A képképzési módokat az általam kialakított fontossági sorrendben részletezem.

#### 3.1 A-mód

Az A módú pásztázás lényegében egy digitális oszcilloszkóp, mely megmutatja, hogy az idő függvényében mekkora nyomás érkezett a mint egy külső felületének pontjaira. Ez lényegében egy  $P(t)$  függvény, adott  $x, y$  koordinátáknál. A  $P(t)$  függvény alakjából következtethetünk arra, hogy az adott  $x, y$  pontnál mely mélységekben van közegetár, és arra is, hogy akusztikai szempontból a hullám milyen minőségű közegből, milyen más minőségű közegbe ment át. Minden anyagnak van akusztikus impedanciája (jele:  $Z$ ), mely az anyagra jellemző Bulk-állandóból (jele:  $B$ ) és az anyag sűrűségéből képződik ( $Z = \sqrt{\rho \cdot B}$ ). A két érintkező közeg akusztikus impedanciájából számítható a közegetárra jellemző reflexiós tényező. A  $P(t)$  hullám fázisa egy adott  $t$  időpontban, attól függően módosulhat, hogy a  $t$  időponthoz tartozó mélységben lévő közegetárnak milyen a reflexiós tényezője. Ismerve a hanghullám átlagos sebességét a vizsgált mintában a  $t$  időponthoz egy mélységet rendelhetünk. Ha a fázis normális, akkor a hullám egy kisebb impedanciájú közegből egy nagyobb impedanciájú közegbe hatolt be, ha a fázis invertált a helyzet épp az ellenkezője.



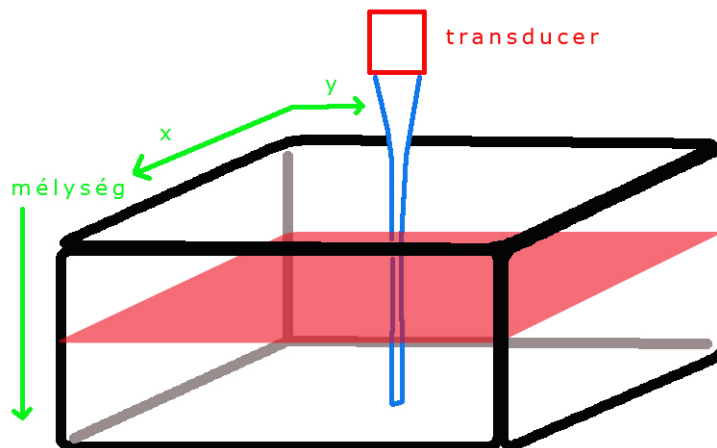
**2. ábra.** A-szken a minta egy adott pontjában, és az onnan nyert  $P(t)$  függvény. Az A-szken a számítógépen lényegében egy digitális oszcilloszkópot jelent, amely a transducerre érkező hanghullámot, azaz egy nyomás idő függvényt jelenít meg.

### 3.2 C mód

A C mód az A módban összegyűjtött adatokkal dolgozik. Egy adott időintervallumban a minta felületének minden pontjában begyűjtött adatokat használja fel. Egy elektronikus ablak segítségével kijelölhetjük a  $P(x,y,t)$  függvény egy időtartományát. Az ablakozás által határozhatjuk meg, hogy a minta mely mélységéből készüljön kép. A 3. ábrán látható a minta egy pontjából nyert  $P(t)$  függvény. Piros négyszög jelöli az elektronikus időablakot. A 4. ábra szemlélteti, hogy a beállított időablakkal a minta mely mélységében készítettünk képet. Az adott időablakba a minta különböző pontjaiból természetesen más és más értékek érkeznek, ez adja a majdan elkészülő kép információértékét. Minden egyes szkennelt pontnak egy képpont felel meg, amiknek egy színe lehet, illetve fekete-fehér képen egy árnyalata. Ezért az időablakban található hullámtöredékből egy adatot kell alkotni. Ez a függvény időablakbeli legnagyobb értéke. A pásztázás során előforduló legnagyobb és legkisebb amplitúdóhoz tartozik az árnyalati skála két széle a fekete és a fehér, és az ezek között előforduló csúcsok felelnek meg a skála árnyalatainak.



**3. ábra.** A-szken képe időablakkal. C-módú képpalkotásakor az időablakban lévő jel kerül feldolgozásra.



**4. ábra.** C-szken a minta egy kitüntetett mélységében. A C-szken segítségével a hullám haladási irányára merőleges síkról készíthetünk képet.

### 3.3 Réteghatár szkennelési technika

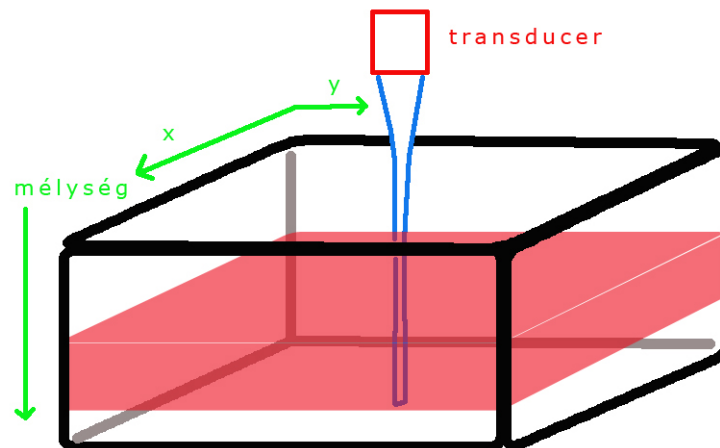
A legelterjedtebb képalkotási mód, amivel az eszközön belüli delaminációkat lehet megtalálni az a réteghatár szkennelési technika (Interface Scan Technique). Első lépésként végre kell hajtani az A szkennelést. Be kell állítani az időablakot a kívánt réteghatárra, az akusztikus sugár fókuszát az adott mélységre kell optimalizálni. A C-szken lefutása után elkészült kép információkat közöl a kiablakozott hullámrészlet amplitúdójáról, és fázisáról. Opcióként be lehet állítani, hogy csak a normál fázisú, illetve csak az invertált fázisú hullámrészletekből alkotott képpont legyen látható. Megoldható az is, hogy mindkettő látszódjék, de az invertált helyek egy kitüntetett színnel, mondjuk pirossal. Delamináció keresés közben ez nagy segítség, hiszen általában ezek okozzák a hullám invertált fázisát. A fázis inverzió oka, hogy a hullám például a tokból közvetlenül nem a szilíciumba jut, (tehát egy kisebb hullámimpedanciájú közegből egy nagyobb hullámimpedanciájúba), hanem először levegőbe (légzárvány) és csak aztán a szilíciumba, (tehát egy nagyobb hullámimpedanciájú közegből egy kisebb hullámimpedanciájú közegbe).

Ez a segítség néha becsaphat minket. Előfordulhat, hogy a szoftver egy területen delaminációt jelez, holott sincs azon a helyen. Ennek egyik oka lehet például, ha a tokozás pelyheket (flake) tartalmaz. Ezek a pelyhek ugyanabból az anyagból vannak mint a tokozás, de annál korábban szilárdultak meg. Érdekes módon ezek hullámimpedanciája kisebb lesz, mint a tok többi részének. Ha ezek a pelyhek közel azonos mélységben vannak a vizsgált felülettel, megteveszthetik a programot.



### 3.4 Tömb szkennelési technika

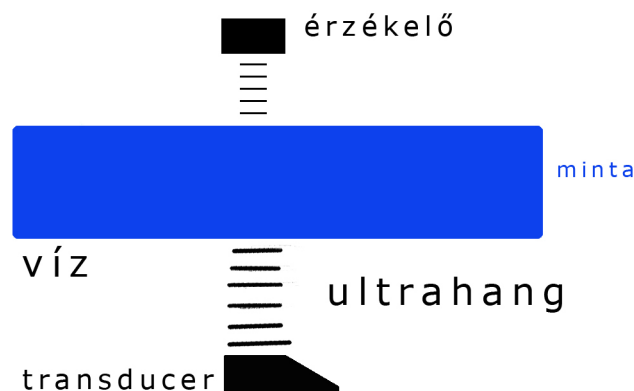
A tömb szkennelés lényege, hogy nem egy közeghatárt, hanem egy térfogatot vizsgálunk. Az időablakot úgy állítjuk be, hogy közvetlenül egy közeghatár után kezdődjön és mindent magába foglaljon a következő határig. A hangsugár fókuszát általában a két határ közé optimalizáljuk. Ha a vizsgált térfogat homogén és mentes minden diszkontinuitástól nem képződik visszhang az időablakban, így az elkészült képen sem látszik semmi. Ha mégis van olyan objektum, ami reflexiót okoz, az a képen világos pontként fog megjelenni.



**5. ábra.** Térfogat vizsgálata C-SAM-mal. Ezzel a technikával két közeghatár közti térfogatot tudjuk megvizsgálni.

### 3.5 Transzmissziós mód

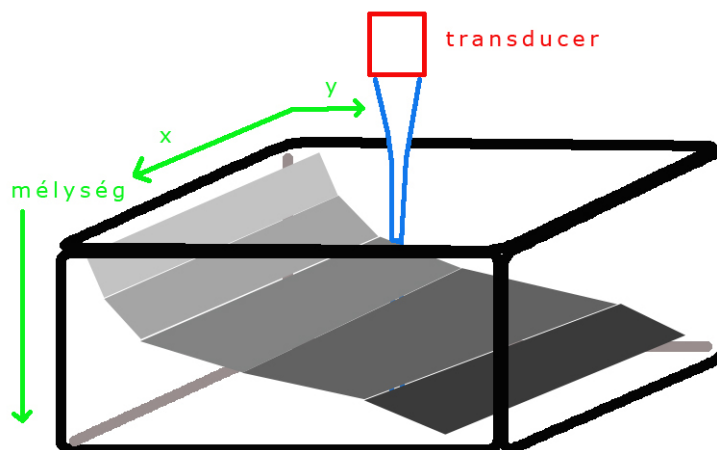
Ez a mód azon alapszik, hogy a minta egyik felületére ultrahangot bocsájtsunk, ez áthatol az anyagon, és azt a másik oldalon egy másik transducer érzékeli. A SLAM a gerjesztésre egy ultrahangos síkhullám transducert használt, a detektálásra pedig lézer pásztázást. A C-SAM THRU-Scan™ mód az érzékelésre egy különálló piezoelektromos transducert használ. A tömbben jelenlévő hibák, jellegükönél fogva a hanghullám egy részét visszaverik, így a továbbhaladó hullám intenzitása csökken. Ezért a hibás helyekről alkotott képpontok sötétek lesznek az elkészült képen. Szemléltető ábraként a 6. ábrát használom.



**6. ábra.** Transzmissziós vizsgálat. A mintán áthaladó hanghullámokat vizsgáljuk, így a hibákat egyszerre a minta teljes térfogatában keressük.

### 3.6 Hullám utazási idő (Time-of-Flight)

Itt nem egy kitüntetett mélységből jövő hullám amplitúdóját, és fázisát detektáljuk, hanem azt mérjük, hogy meddig tart a hullámnak eljutni a minta felületétől egy kiválasztott közeghatárig. A hullám utazási idejéből számíthatjuk a határ mélységét. A változó mélységhez egy színskálát, vagy szürkeárnyalatos skálát rendelhetünk hozzá, ahol a közeghatár magasabban fekvő területei világosak, és az alacsonyabb területei sötétek. Ezt a képalkotási módot elsősorban mikrorepedések kontúrjának követésére, egy felület nem egysíkúságának detektálására, és két felület nem párhuzamosságának felderítésére használják. Például, ha egy IC tokozása előtt a szilícium lapkát ferdén ültették be, és így az elkészült eszköznél a borítás síkja nem párhuzamos a lapka síkjával. A 7. ábra szemlélteti ezt a képalkotási módot.



7. ábra. TOF képalkotási mód. A képen az azonos árnyalatok a minta azonos mélységét jelentik.

### 3.7 B-mód

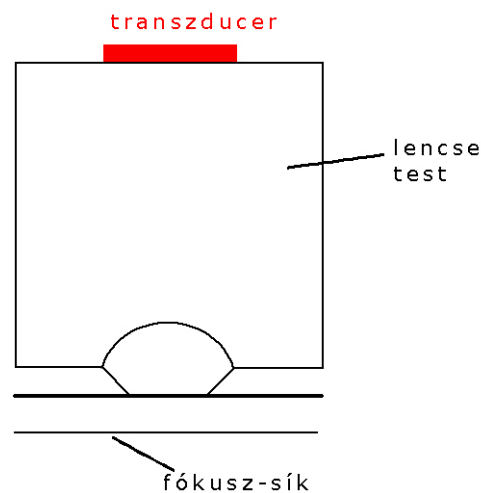
Ez a képalkotási mód lényegében egy virtuális keresztcsizolat a mintáról, egy kijelölt síkban ( $P(x=x_0, y, t)$  függvény alapján készül a kép). A berendezés minden egyes pontban, és minden mélységben optimalizálja a fókuszt, így az elkészült kép minden területe megfelelő élességben látható. A B-szken egy a minta felületére merőleges síkról alkot képet, míg az eddigi módok képei egy a minta felületével párhuzamos síkról készültek.

## 4. Lencsék [2]

Ebben a fejezetben az akusztikus mikroszkópiában használatos, különböző lencsekialakításokat fogok összehasonlítani. A transducert, mely az elektromos energiát hanghullámmá alakítja egy akusztikus lencsére szerelik fel. A lencse feladata, hasonlóan az optikai lencsékhez, a hullám fókuszálása. Az akusztikus vizsgálat alatt egy interferencia mechanizmus következtében szivárgó hullámok is keletkeznek. E szivárgó hullámok jelenlétének mértékét egyrésztől a lencse kialakítása, másrésztől a vizsgált tárgy anyagi minősége befolyásolja, és a  $V(z)$  függvénnyel jellemzik. E függvény megadja a lencse és a tárgy közti távolság függvényében a lencséről visszaverődő szivárgó hullám amplitúdóját. A  $V(z)$  jelet befolyásolja a szivárgó hullámok sebességének megváltozása. Miközben ezek a szivárgó hullámok a tárgy belsejét szondázzák, bármilyen változás az anyag elasztikus állandójában, sűrűségében változást okoz a szivárgó hullámok sebességében.

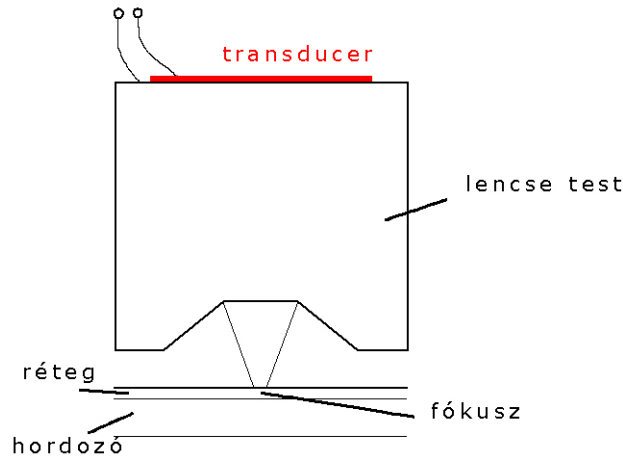
Az új lencsék kialakításában arra törekedtek, hogy növeljék ezen hullámok jelenlétét, és a lencsék karakterizáló képességét. A lencsék karakterizáló képességének segítségével anizotrop anyagokban iránytól függően lehet meghatározni, hogy benne az akusztikus hullám milyen sebességgel terjed.

A **szférikus lencsével** lehet a legjobb felbontást elérni, de gyenge karakterizáló képességgel rendelkezik. A lencse körkörös szimmetriája csak izotrop anyagok karakterizálását teszi lehetővé. A lencse forgástest, az ábra ennek egy metszetét mutatja.



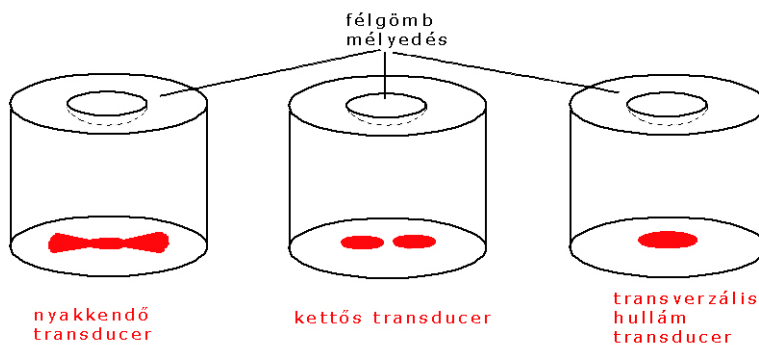
8. ábra. Szférikus lencse. Jó felbontás, de gyenge karakterizáló képesség.

A **Lamb hullám lencsékkel** el lehet érni, hogy a vizsgálat során a szivárgó hullámok nagyobb arányban legyenek jelen. A vizsgált anyag paramétereit tekintve legalább egy nagyságrenddel kisebb megváltozást lehet vele kimutatni, mint a hagyományos, szférikus lencsével. Ezenkívül az általa kibocsátott referencia jel erőssége is nagyobb, és ez a jel nem gyengül jelentősen, ha a tárgy kimozdul a lencse fókuszából. A lencse forgástest, az ábra ennek egy metszetét mutatja.



**9. ábra.** Lamb hullám lencse. Nagyobb érzékenység jellemzi a vizsgált anyag akusztikus paramétereire. E tulajdonság az anyagok karakterizálásánál fontos.

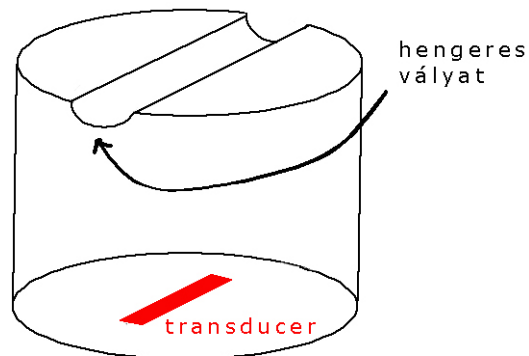
Ahhoz, hogy egy anyag kristálytani irányainak függvényében is tudjunk vizsgálatokat végezni, a körkörös szimmetriát meg kell bontani. Ezt megtehetjük egyfelől úgy, hogy más alakú transducereket alkalmazunk, másfelől úgy, hogy a lencsék geometriáját változtatjuk meg.



**10. ábra.** Különböző típusú transducerek. A körkörös szimmetria megbontásával irány szerinti karakterizálás válik lehetővé.

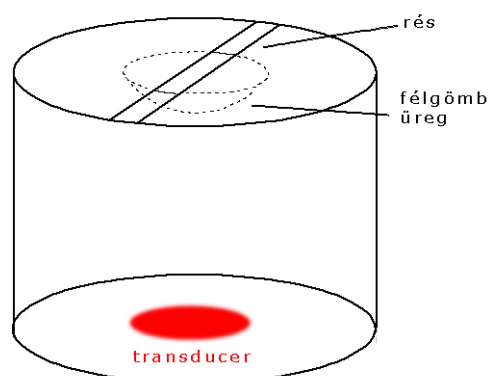
A következőkben körkörös szimmetriával nem rendelkező lencsetípusokat mutatok be, melyek ezáltal alkalmasak anizotróp anyagok karakterizálására.

Az **LFB** (line-focus-beam) **lencse** rendelkezik azzal a tulajdonsággal, hogy érzékeny a különböző irányokra, ezáltal alkalmas anizotróp anyagok vizsgálatára. Ezzel szemben gyenge felbontást lehet vele elérni, így képalkotásra nem megfelelő. A kibocsátott szivárgó hullám komponens is kisebb amplitúdójú összehasonlítva a hagyományos szférikus lencsével.



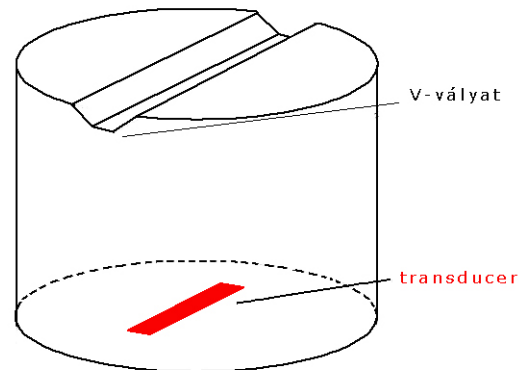
**11. ábra.** LFB lencse. Képes anizotróp anyagok vizsgálatára, de gyenge a felbontóképessége.

A **hasított apertúras lencse** kompromisszum a jó felbontás és a pontos karakterizáló képesség között. Az LFB lencsével szemben képalkotásra is lehet használni, miközben iránytól függő hullámsebesség mérésére is alkalmas. E lencse hátránya az alacsony jel-zaj viszony.



**12. ábra.** Hasított apertúras lencse. Kompromisszum a jó felbontás és a pontos karakterizáló képesség között.

A **V-hornyú lencse** karakterizáló képessége hasonló az LFB lencséjéhez, miközben közel olyan nagy mértékben kelt szivárgó hullámokat, mint a Lamb hullám lencse.



**13. ábra.** V-hornyú lencse. Ötvözi az LFB, és a Lamb hullám lencse jó tulajdonságait.

## 5. Hogyan kezdünk neki, és a kép készítése

Jelen fejezetben bemutatom azt, hogy mi a menete egy C-SAM-mel történő vizsgálatnak. Ezzel nemcsak egy átfogó képet szeretnék festeni az eljárásról, hanem bemutatni azt is, hogy a vizsgálat mennyire összetett, és mi mindenre kell odafigyelni. Erre vonatkozó leírást sem a berendezés dokumentációjában, sem a dolgozatomhoz felhasznált irodalomban nem találtam.

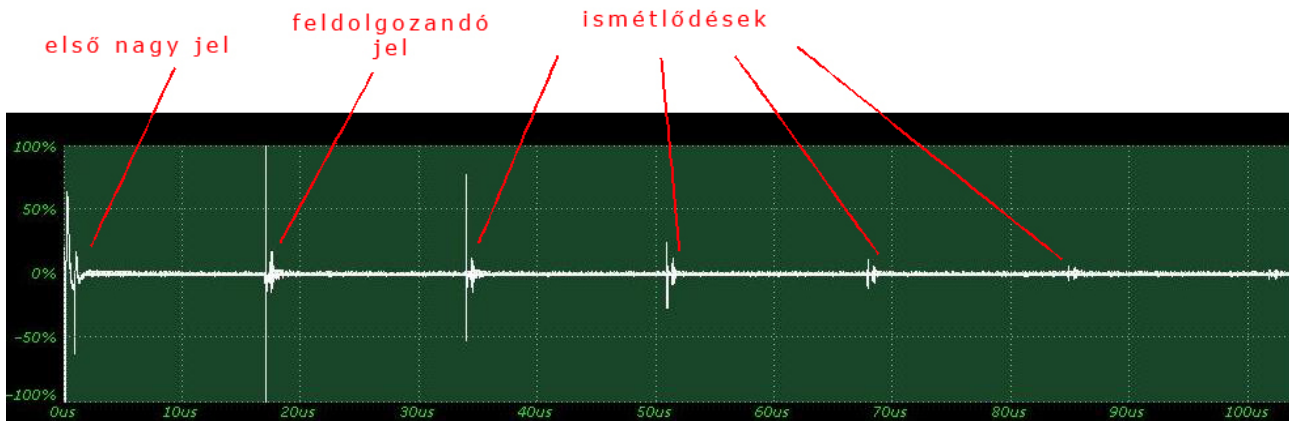
A vizsgálandó mintát előkészítjük: végiggondoljuk, hogy melyik oldaláról szeretnénk belenézni. Ehhez hozzátartozik az is, hogy belső szerkezetének melyik részét szeretnénk vizsgálni, valamint, hogy arról az oldalról sorban olyan rétegek helyezkedjenek el, hogy azokon a hanghullám be tudjon hatolni a vizsgált térfogatba, illetve közeghatárig.

Megtisztítjuk a külső szennyeződésektől, hiszen ezek szórhatják a hanghullámot, mivel plusz közeghatárokat jelentenek az ultrahang útjában. Ráadásul mivel ezek közel sem sík felületek, melyek normálisan párhuzamos a hullám sebességvektorával, hanem amorf formával rendelkeznek a tér legkülönbözőbb irányába szórják el a hullámokat, amik soha nem érkeznek vissza a transducerbe. Ez veszteség.

A pozícióba helyezett és megtisztított mintákat egy sík plexilapra, a mintatartó asztalra ragasztjuk kétoldalas, vízre kevésbé érzékeny ragasztószalaggal. A minták korábban említett okok miatt, teljes egészükben víz alá kerülnek. A víz jelen esetben ioncserélt vizet jelent, melynek oka az, hogy a vizsgálandó alkatrészt minél tisztább környezetbe helyezzük el. Fontos, hogy a minták, és a mintatartó asztal jól legyenek rögzítve, hiszen a transducer egy jelentős része is víz alatt lesz, és pásztázás közben a vizet is mozgatja. Ha a minták vizsgálat közben elmozdulnak, az a mérést teljesen tönkre teszi.

Ha a berendezést már nem használjuk a transducert ki kell emelni a vízből, és az újabb mérés előtt beleengedni, olyan mélységig, hogy mikor azt x-y síkban mozgatjuk a minta vizsgálati síkjával párhuzamosan, ne ütközhessen más tárgyba a víz alatt, ami esetleg végleges deformációt okozhatna a vizsgálófejen. A másik dolog, ami a transducer fel-le mozgatásához kapcsolódik, az a légbuborék. A fej végén található az akusztikai lencse, melynek geometriája hasonló egy fejjel lefelé fordított lavórhoz. Ebből következően, mikor a transducert a víz alá engedjük egy apró légbuborék tapad meg ebben a „lavórban”. Mivel levegőben a hullám igen gyengén terjed, ez a mérést teljesen lehetetlenné tenné. Hasonló boborékok tapadhatnak meg a minták felületén és kivezetéseik között. Ezeket ioncserélt vízszugár segítségével el kell távolítani. Most már minden kész, hogy előkészítsük a szkennelést.

A transducert szemre a minta fölé mozgatjuk. Útja közben nem csak a fej mozgását figyeljük, hanem az A-szken képét is, mikor a minta fölé érünk, az jellegzetesen megváltozik. Az első nagy jel számunkra nem hordoz információt, az lényegében még a lencséről visszaverődött, a lencse belső reflexiói okozta jel. A második nagyobb jel maga a minta, teljes terjedelmében. Ha megnézzük a többi kisebb jelet, azok azonos időközönként ismétlődnek és kvalitatív azonosak a második jellel (14. ábra). Ezek valóban az első értelmes jel időben csillapodó ismétlődési, és mint olyanok, ezek sem érdekelnek minket. Az ismétlődések oka, hogy a hullám többször is bejárja az utat a transducer és a minta között, amit a fej ugyanannyiszor érzékel is, de ezek az út közben csillapodnak. Ha jó a szemünk az ábrán 4 ismétlődést is megfigyelhetünk.

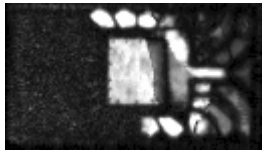
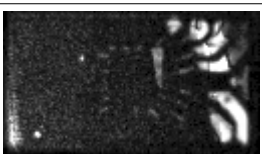
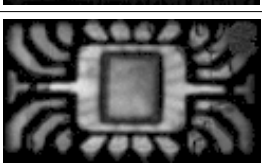


**14. ábra.** A mintából érkező jel és azok ismétlődései. Az ismétlődő jelek oka, hogy a reflexiók miatt a hang egy utat többször is megtesz.

A következő lépéshez elengedhetetlen a felső felület követő (front surface follower, FSF) ismertetése. Képzeljük el, hogy már beállítottunk egy időablakot, tehát a minta egy bizonyos mélységében lévő síkról szeretnénk felvételt készíteni. Ez a sík párhuzamos a tokozás felső lapjával. A mintát viszont lehet, hogy úgy raktuk be a vízbe, hogy a tokozás felső síkja és a transducer mozgatómechanika x-y síkja nem párhuzamos. A pásztázás, és így a képalkotás is a mozgás síkjához kötődik, ami a számunkra érdekes síkot egy vonalban fogja metszeni. Hogy ne kelljen precíziósan behelyezni a mintát, kitalálták az FSF-et. Mint ahogy a neve is utal rá, a gép képalkotáskor szoftveresen követi a minta felső síkját. Ehhez nekünk be kell állítani azt a közegetart, az A-szkennen, ami vélhetően a minta külső felületét jelenti. Az FSF beállítása lényegében egy időtartomány kijelölésével jár, amely tartományban a minta tetejét jelentő jel szkennelés közben előfordul. Ha a mintát nagyon ferden raktuk be, és ehhez képest az FSF időtartomány túl rövid, akkor a minta egy bizonyos területén elveszítjük a felületkövetést.

Amikor az időablakot elhelyezzük, annak pozíciója relatív lesz az FSF-hez, ha az időablak konfigurálásakor beállítjuk, hogy kövesse az FSF-et. Így érhetjük el, hogy az elkészült kép minden pontja a minta azonos mélységében készüljön. A 2. táblázatban szemléltetem az FSF előnyeit.

**2. táblázat.** FSF nélkül, és annak segítségével készült képek. FSF használata nélkül előfordulhat, hogy a sík, amelyről a képet készítettük nem párhuzamos az alkatrész tetejével. Képkalkotáskor a réteghatár szkennelési technikát alkalmaztam.

	A képet FSF nélkül készítettem, az időablakot a szelet és a chiptartó közeghatárra állítottam be.
	A képet FSF nélkül készítettem, az időablakot a tok és a szelet közeghatárra állítottam be.
	A képet FSF használatával készítettem, az időablakot a szelet és a chiptartó közeghatárra állítottam be.

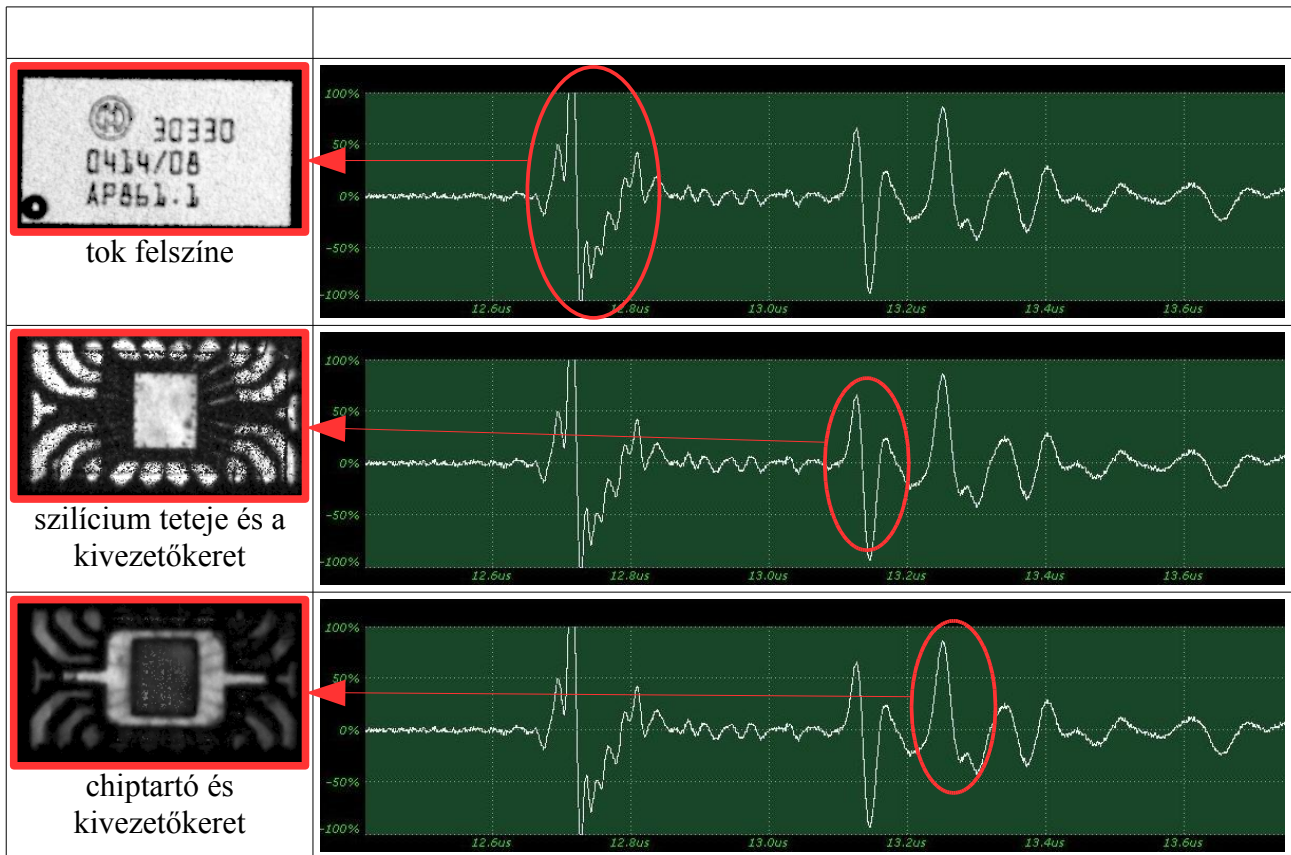
Tehát az FSF-et elhelyezzük a második jel elejére. Az Auto Resize and Center funkcióval a berendezés automatikusan megkeresi a minta határait. Ezt az FSF segítségével teszi. A mechanika lassan +x,-x és +y,-y irányokban elkezd mozgatni a transzducert a minta fölött, mikor leszalad róla, az általunk kijelölt FSF tartományban megszűnik a jel. Ezeket a koordinátákat regisztrálja. Így tehát a minta sziluettjét egy téglalappal közelíti.

Ha a minta csak egy kisebb részére vagyunk kíváncsiak, akkor manuálisan is kijelölhetjük a pásztázási területet, így a végleges képkalkotás nem fog annyi időt igénybe venni. Azonban előtte érdemes egy gyors pásztázást lefuttatni az automatikusan beállított területről, így könnyebb beállítani a számunkra érdekes területet. Az is előfordul, hogy azonos alkatrészek egy csoportját vizsgáljuk egyszerre. Ilyenkor egy eszköz területét meghatározzuk, és az alkatrészek számának, és elhelyezkedésének ismeretében, manuálisan a pásztázási területet arányosan nagyobbra állítjuk.

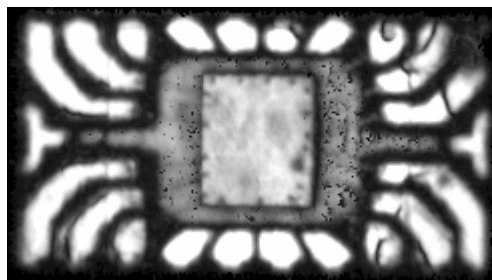
Miután beállítottuk a pásztázási területet, meg kell határoznunk, hogy az alkatrész mely mélységéből készüljön kép. Ezt az A-szken alapján kell meghatároznunk. A közeghatárok (víz - tok, tok - szilícium szelet, szilícium szelet - chip rögzítés, chip rögzítés - hordozó, hordozó - tok) az A-szken jelen általában amplitúdó ugrásként jelennek meg. Ezek segítséget nyújtanak nekünk, hogy az alkatrész mely belső szerkezeti eleméhez, mely időintervallum tartozik (3. táblázat).



**3. táblázat.** Az A-szken különböző részletei a vizsgált minta különböző mélységben lévő rétegeit reprezentálják. A táblázatban három réteghatárt jelentő hullámrészletet és a belőlük alkotott képeket emelem ki.



A programnak az elektronikus ablak elhelyezésével tudjuk megmondani, hogy mely mélységekből érkező hullámokat vegye figyelembe a képalkotáskor. Az ablaknak mindenképpen magába kell foglalnia az érdekelt mélységhez tartozó jeleket, de ügyelni kell arra, hogy ne legyen túl nagy, mert így más mélységek jelei zavaró momentumként fognak megjelenni a képen. Ha például a szilícium lapka tetejét nézzük, és az ablak az azelőtti információkat is tartalmazza akkor a minta tetején lévő írás zavaróként megjelenhet az elkészült képen, ha az azutáni információkat is tartalmazza, akkor a mélyebb rétegekből jövő jelek a kép amúgy sötét területeinek kivilágosodását okozhatják, így a részletek nehezebben lesznek kivehetőek. A 15. ábrán egy olyan kép látható, ahol a tok-szelet réteghatárról szerettem volna képet készíteni, de az időablakba belevettem a szelet-chiptartó közeghatár jeleit is. A kép így nem mondható mélység specifikusnak, hiszen két réteghatárról jövő jelek keverékéből készült a kép.



**15. ábra.** Egyszerre két réteghatárról készült kép. A kép egyszerre jeleníti meg a tok-szelet és a szelet-chiptartó réteghatárt.

A megfelelő réteg meghatározásában segítséget nyújthat a TAMI szken. Ebben az eljárásban két időablakkal tudunk operálni: az egyik az eddigiekben is használt (Data Gate), ehhez jön hozzá a TAMI (TAMI Gate) időablaka.

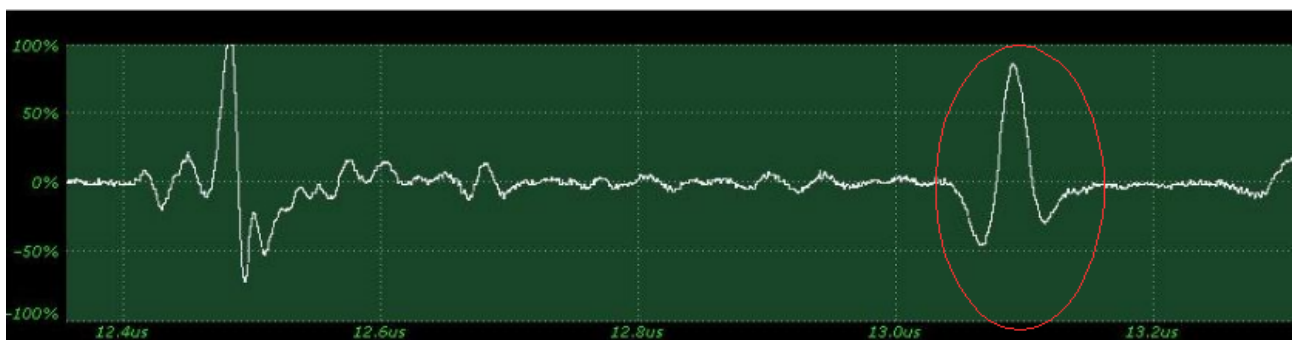
Egy lehetséges beállítás például, hogy a Data Gate-et beállítjuk a minta tetejére, és a Tami ablakot az egész mintára, tehát a minta első reflexiójánál kezdődik, és tart egészen addig, amíg a jelek elhanyagolhatóvá nem gyengülnek. A rendszer a TAMI intervallumot felosztja Data Gate hosszúságú részekre és minden részről képet alkot. Azt is megadhatjuk hogy a részek ne közvetlenül egymás után jöjjenek, hanem előre beállított idejű késéssel, vagy átfedés legyen közöttük. Az elkészült képek között böngészve a szoftver jelzi, hogy az aktuálisan megjelenített képhez, melyik időablak tartozik.

Ha meghatároztuk az időablakot, be kell állítani a megfelelő fókuszálást. Ez úgy történik, hogy a mozgó mechanikával a transducert közelítjük, illetve távolítjuk a mintától és megkeressük azt a pozícióját, ahol az időablakon belül legnagyobb a számunkra érdekes jel amplitúdója.

Ezután az erősítést úgy érdemes beállítani, hogy a kép alkotása közben előforduló legnagyobb amplitúdó, az A-szken méréshatárának a 2/3-a legyen, így érhető el jó kontraszt. A legnagyobb amplitúdót adó helyeket, a gyors szken segítségével találhatjuk meg. A képen a legvilágosabb helyeknek megfelelő pozícióba állítva a transducert, az A-szken-en megjelenik az onnan nyert jel, és az időablakban a kép alkotásához felhasznált jel részlete.

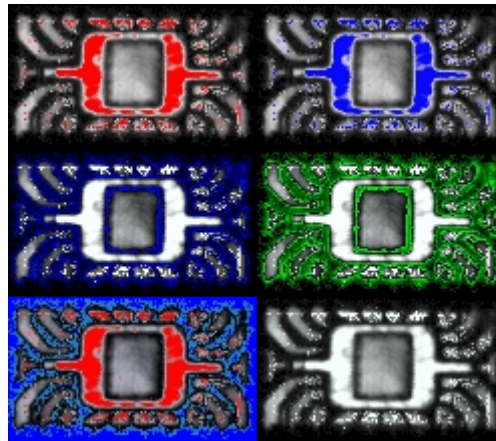
Ha mindent beállítottunk, akkor a szkennelés előtti utolsó lépés a szkennelés paramétereinek beállítása. Beállíthatjuk, hogy a transducert milyen sebességgel mozgassa a mechanika, illetve mekkora legyen annak maximális gyorsulása, és hogy hány mikrométerenként vegyen mintát a vizsgálandó tárgy felületéről. A korábban már említett gyors szkenhez általában 100  $\mu\text{m}$ -es közt szoktam beállítani és 100 mm/s-os sebességet. A végső képalkotásnál ugyanezek az értékek: 10-50  $\mu\text{m}$  és 30-60 mm/s.

Az elkészült képen ki tudunk jelölni egy pontot, és utasítani a mechanikát, hogy vigye fölé a transducert. Az A-szkennen megjelenik a minta ezen tartományához tartozó jel. Delamináció meghatározásánál a vizsgált rétegből jövő invertált fázisú hullámot keressük. A gyanús, vagy tipikusan delaminálódott tartományok fölé mozgatva a transducert megvizsgáljuk az A-szken jelét. A 16. ábra egy invertált fázisú hullámot mutat, a szelet- mellől, a szelet-chiptartó közegethatárról.



**16. ábra.** Invertált fázisú hullám. A nyomás-idő függvényben lévő fázis inverzió delaminációra utal a megfelelő mélységben.

Az elkészült kép alapállapotban szürkeárnyalatos, ezt a program segítségével a későbbiekben módosíthatjuk. A teljes árnyalati tartományt kicserélhetjük más szín árnyalataira, vagy akár egy részét egy másik színre, egy másik részét egy harmadik színre. Néhány árnyalataiban módosított képet tartalmaz a 17. ábra. A két felső képen a világosabb részeket állítottam át piros illetve kék színre. Az alatta lévő két képen a sötét részeket állítottam át kék illetve zöld színre. A bal alsó sarokban a kép sötét árnyalatait a kék szín árnyalatainak feleltettem meg, a világos árnyalatokat a piros szín árnyalatainak. A közbeeső árnyalati tartományt nem módosítottam. A jobb alsó kép az eredeti felvétel.


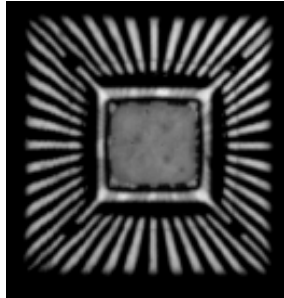
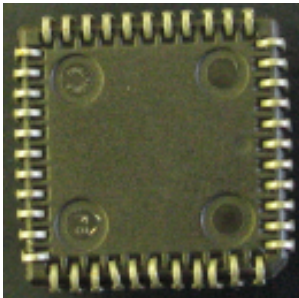
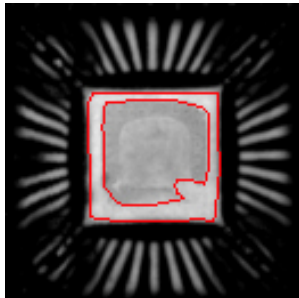


**17. ábra.** Az elkészült kép árnyalatainak módosítása

## 6. Saját munka

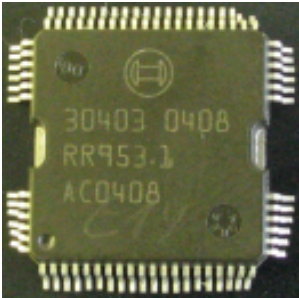
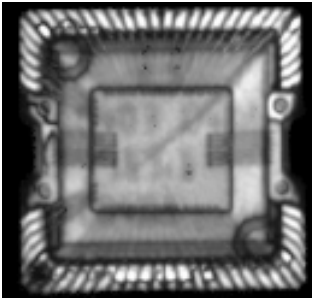
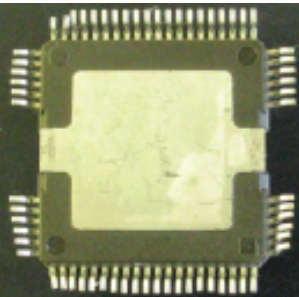
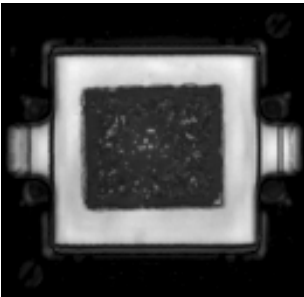
A Bosch jóvoltából lehetőségem volt néhány, napjainkban használatos alkatrészt megvizsgálnom. Az alkatrészekről optikai és akusztikus képet is készítettem, felül- és alulnézetből egyaránt. A képeket táblázatba foglaltam, ahol a jobboldali oszlopban az optikai, a baloldali oszlopban az akusztikus képeket helyeztem el. Az első sor a felülnézet, a második az alulnézet. Az alkatrészeket külön tárgyalom, mindegyikhez megjegyzésként leírom tapasztalataimat, és azt, hogy hogyan értelmezem a képet. A fejezet végén részletesen tárgyalom egy IC komplex vizsgálatát.

**4. táblázat** Delamináció vizsgálata a chiprögzítésben

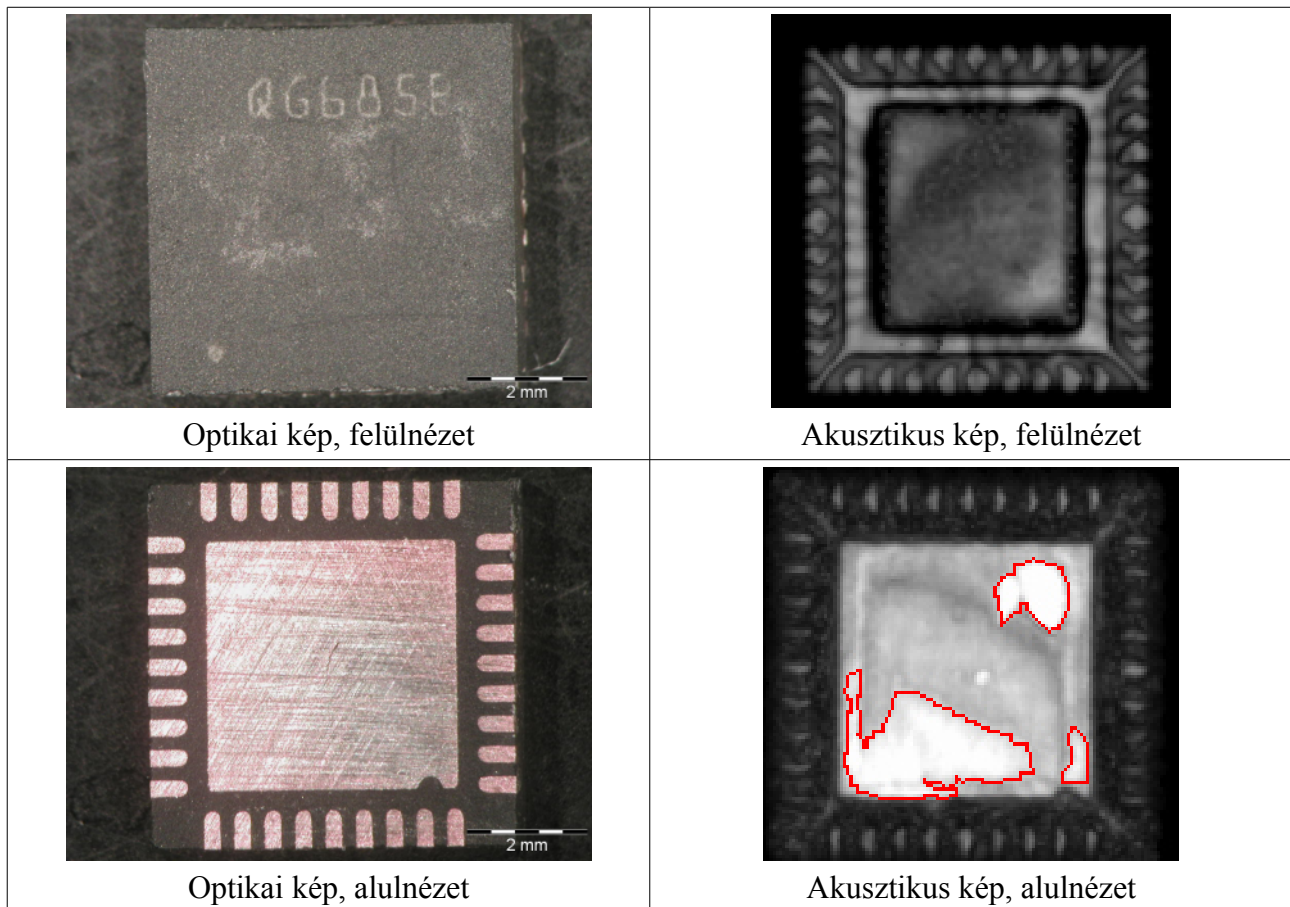
 <p>Optikai kép, felülnézet</p>	 <p>Akusztikus kép, felülnézet</p>
 <p>Optikai kép, alulnézet</p>	 <p>Akusztikus kép, alulnézet</p>

Az alsó akusztikus kép a szilícium-chiptartó réteghatárról készült 50 MHz-es fejjel. A kép közepén lévő fehérebb területek a minta enyhe delaminálódottságát jelzik. A könnyebb megfigyelhetőség végett a terület határait pirossal bejelöltem.

**5. táblázat** Légzárványok egy teljesítmény IC chiprögzítésében

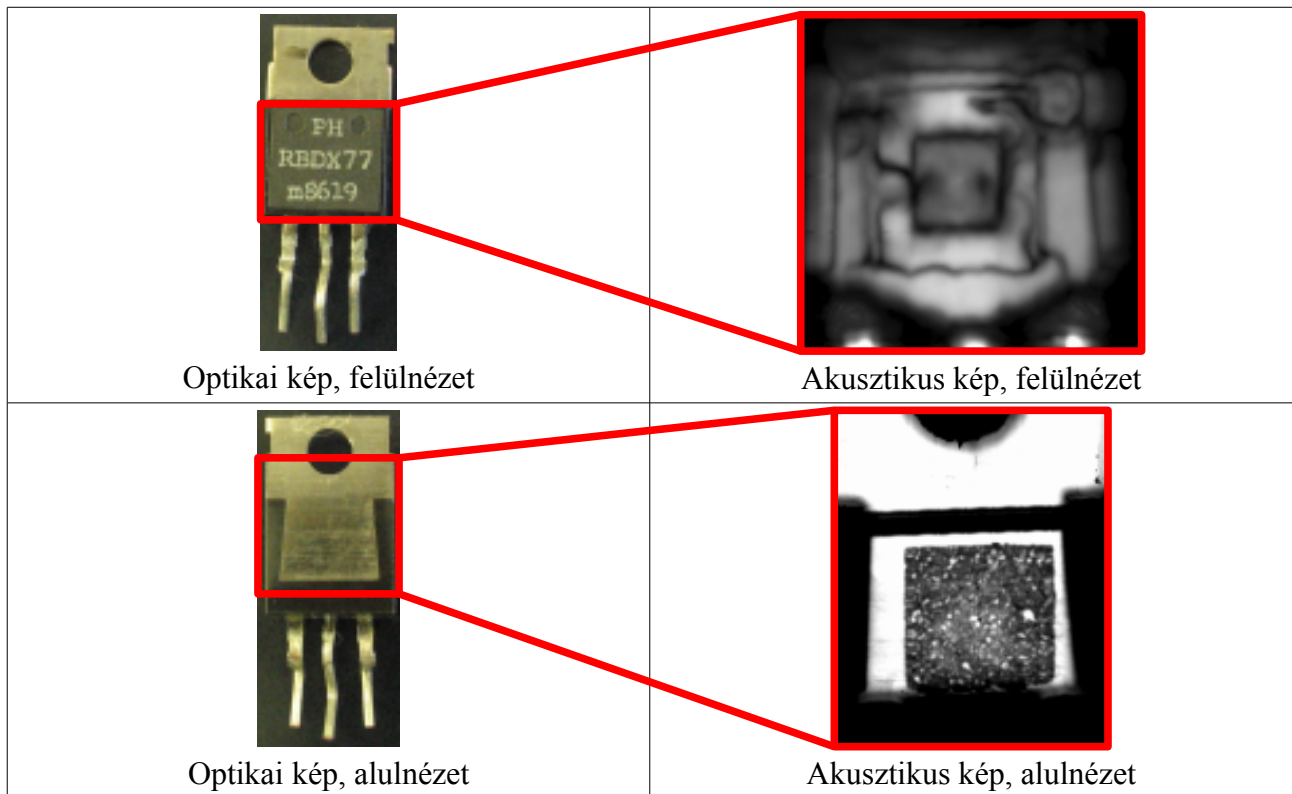
 <p>Optikai kép, felülnézet</p>	 <p>Akusztikus kép, felülnézet</p>
 <p>Optikai kép, alulnézet</p>	 <p>Akusztikus kép, alulnézet</p>

Az akusztikus felvételek 50 MHz-es fejjel készültek. A szilícium szelet-chiptartó réteghatárról készült képen a szelet fölött lévő apró fehér pontok légzárványokra utalnak.

**6. táblázat** Delamináció vizsgálata a chiprögzésben

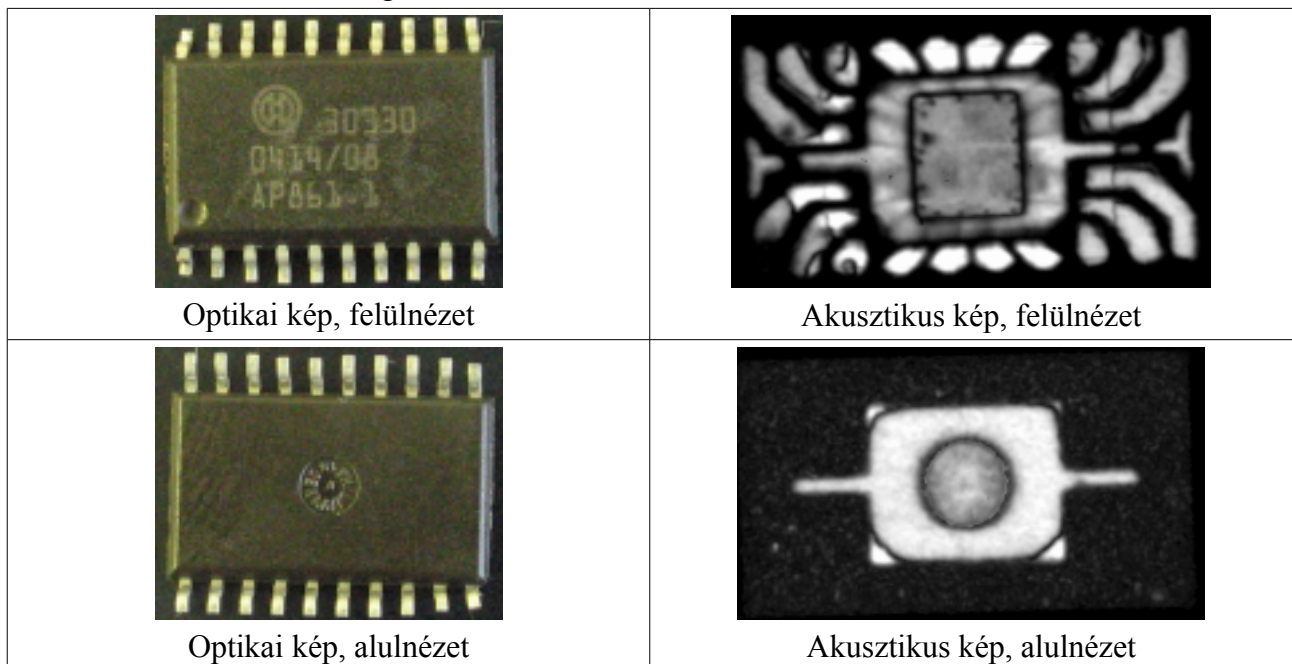
Ezeket a képeket azért tartom érdekesnek, mert 50 MHz-es fejjel egy ilyen apró alkatrésztől igen szépen sikerültek. A felső képen még a huzalkötések is megfigyelhetők. Mivel ez az alkatrész meglehetősen vékony, a benne lévő anyaghatárok egymáshoz közel helyezkednek el, így nehéz volt megtalálnom az A-szennek azt a részletét, amellyel ezeket a képeket készítettem. Az alsó kép erősen fehér területei delaminálódottságra utalnak. A könnyebb megfigyelhetőség végett a terület határait pirossal bejelöltem.

**7. táblázat** Légzárványok egy TO tokozású tranzisztor chiprögzítésében

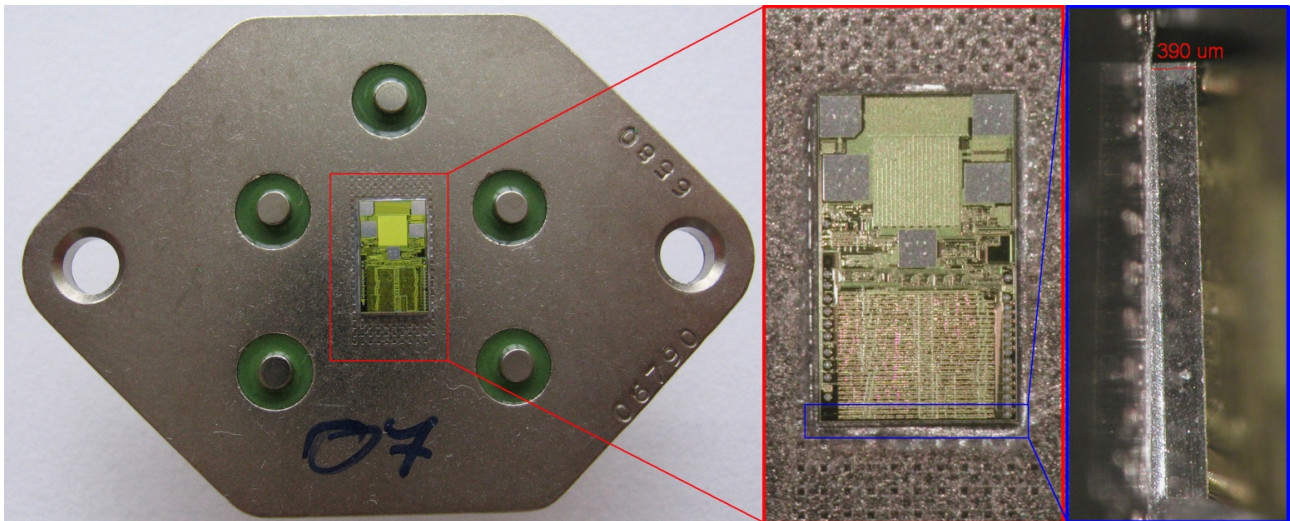


A felső akusztikus kép 15 MHz-es, az alsó 50 MHz-es fejjel készült. Az alsó képen zárványosság figyelhető meg.

**8. táblázat** Delamináció vizsgálata a kivezetőkereten

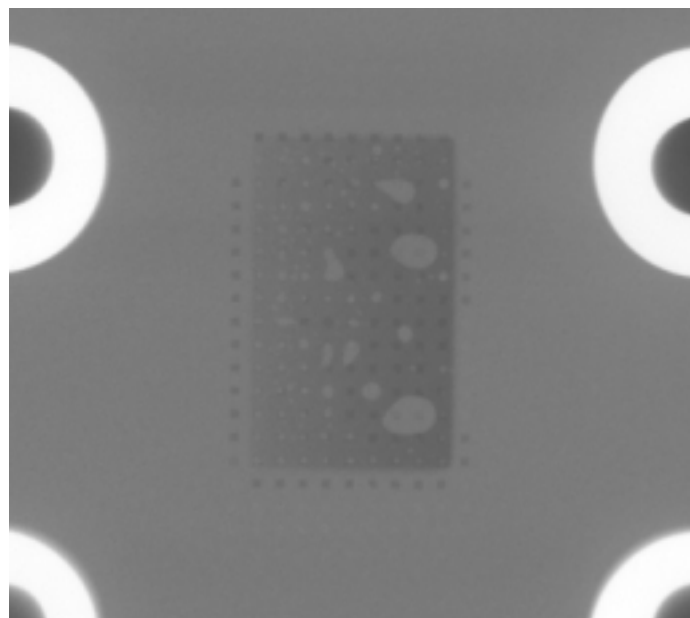


Az akusztikus képek 50 MHz-es fejjel készültek. A felső képen látható chiptartó szilíciumszelet melletti területei nagy mértékben delaminálódtak. Ezt a több pontban vett A-szken jelei is alátámasztják. Ezen kívül delamináció figyelhető meg a kivezetőkeret egy részénél is, ahol a tok anyaga vált el a kivezetőkerettől.

TO tokozású IC vizsgálata

**18. ábra.** A vizsgált IC. Fénykép a teljes alkatrésztől, felülnézeti és oldalnézeti optikai kép a szilícium szeletről.

Az eszközt a képen látható módon, tokozás nélkül bocsátották rendelkezésemre. Először optikai felvételeket készítettem. A harmadik képen megfigyelhető, hogy a szelet és a hordozó felületei nem párhuzamosak. A szelet második kép szerinti jobb oldala alatt, ami a harmadik képen a chip alsó felének felel meg, jelentősen több a forrasztanyag. Miután elkészítettem az optikai felvételeket, és megmértem a szelet vastagságát, röntgenkép is készült a mintáról.



**19. ábra.** Az IC-ről készült röntgenkép. A szilícium területén lévő fehér foltok légzárványok jelenlétét mutatják.

A röntgenkép az optikai képnek megfelelő pozícióban készült. A képen látható fehér foltok a forrasztanyagban lévő zárványokat jelzik. Látható, hogy a szelet jobb oldala alatt, ahova láthatólag nagyobb mennyiségben került forrasztanyag, több és nagyobb üregek keletkeztek.

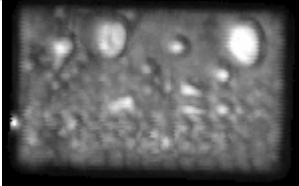
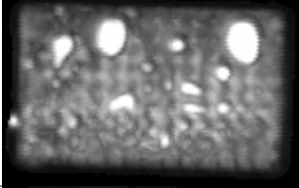
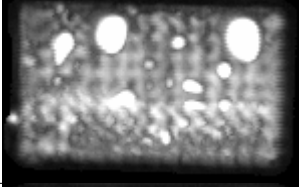
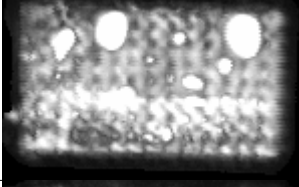
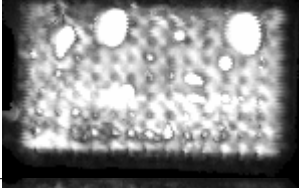
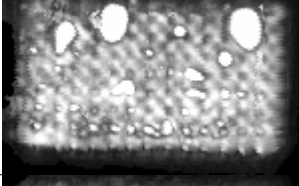

A röntgenfelvételek után készítettem egy sorozat akusztikus képet.

FSF segítségével megmértem, hogy a kibocsátott hanghullám mennyi idő múlva érkezik vissza a szilícium tetejéről, illetve a fém hordozóról. A kettő közti időkülönbségből, és a vízben történő terjedési sebességből kiszámoltam a szilícium szelet vastagságát:

$0,2569 \mu\text{s} * 1,483 \text{ mm}/\mu\text{s} = 0,381 \text{ mm}$ . Ez 9 mikrométer eltéréssel megfelel az optikai mérésnek.

A következő képek mind a szilícium-fém hordozó réteghatárról készültek, különböző fókuszálással.

**9. táblázat.** Réteghatár szkennelési technikával készült képek. Az időablak a szilícium–fém hordozó réteghatár jeleit foglalja magába.

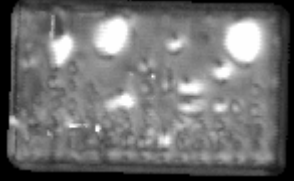
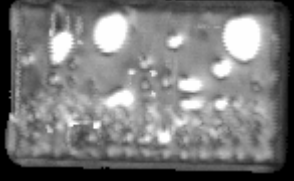


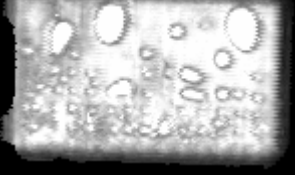
A transducer és a Si teteje közti távolság		Az akusztikus kép
1.	12,637 mm	
2.	11,694 mm	
3.	10,598 mm	
4.	9,644 mm	
5.	8,669 mm	
6.	7,525 mm	
7.	6,606 mm	

A képeket réteghatár szkennelési technikával, 75 MHz-es fejjel készítettem. Az így készült felvételeken meg tudtam vizsgálni, hogy van-e delamináció a szelet és a hordozó között. Úgy találtam, hogy a minta nem delaminálódott. A legélesebb, és legkontrasztosabb képnek a 6. kép mondható. Az összes többi kép, mely ettől eltérő fókuszáltsággal készült, életlen. A képeken látható fehér foltok jelzik a zárványokat.

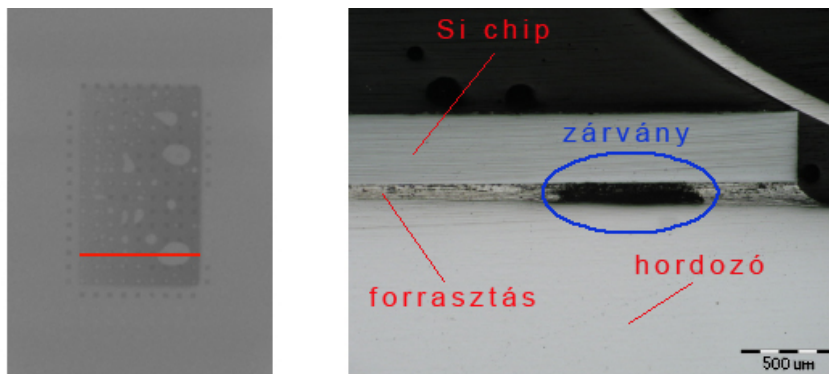


Készítettem néhány képet tömb szkennelési technikával. Az időablak a szilícium-forraszanyag réteghatártól a forraszanyag-hordozó réteghatárig tart. Ezzel a beállítással a zárványokra koncentráltam, és tudtam róluk jobb képet készíteni.

**10. táblázat.** Légzárványok. Az időablak a forraszanyag jeleit foglalja magába.

A transducer és a Si teteje közti távolság		Az akusztikus kép
1.	12,281 mm	
2.	11,263 mm	
3.	10,289 mm	
4.	9,243 mm	
5.	8,286 mm	

A legjobb képnek az utolsót találom. Itt látható a legtöbb zárvány, és a sziluettjük is itt a legkontrasztosabb. A felső képek alján zavaró momentumként megjelenik a fém hordozó raszteres lyukacsossága.



**20. ábra.** Keresztcsiszolat egy légzárványról

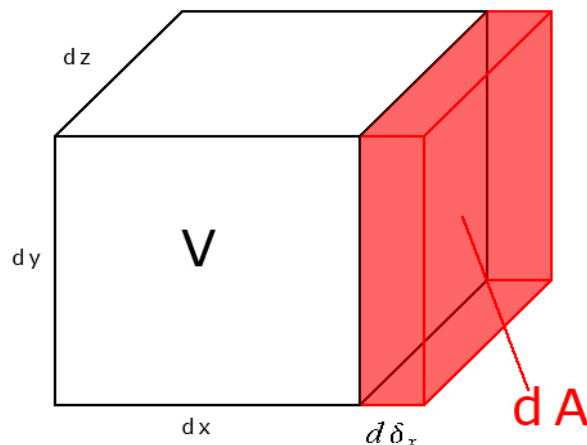
Végül keresztcsiszolatot készítettem a mintáról. A baloldali röntgenképen piros vonallal bejelöltem, hogy a keresztcsiszolat milyen mélységben készült. A jobboldali képen a keresztcsiszolatról készült optikai kép látható. A kék ellipszis a légzárványt jelöli.

## 7. A hanghullám és az elektromágneses hullám közti analógia [3],[4]

E fejezetben szeretnék rámutatni a hanghullám és az elektromágneses hullám közti analógiára. Röviden levezetem először a hanghullámra, majd az elektromágneses hullám távvezetéken történő terjedésére vonatkozó egyenletet. A levezetések végén egy táblázat formájában rámutatok az egyenletek hasonlóságára. A táblázat azt is közli, hogy a távvezeték mely elektromos paraméterei analógok egy anyag akusztikus paramétereivel.

### Hullámegyenlet

A hanghullámot elképzelhetjük úgy, hogy a közeg nyomása tértől és időtől függően változik a tér elemi kis térfogataiban. Képzeljünk el egy elemi kockát a térben (21. ábra). Nyújtsuk meg ezt  $x$  irányba  $d\delta_x$ -vel.



**21. ábra.** Elemi kocka, mely a közeg egy kis térrészét modellezi. Az elemi térrészek alakváltozását a hely függvényében  $\delta_x(x)$  adja meg.

Ekkor az elemi kocka megváltozott térfogatát a következőképpen írhatjuk le:

$$dV = (dx + d\delta_x) \cdot dy \cdot dz = dV_0 + d\delta_x \cdot dy \cdot dz = dV_0 \cdot \left(1 + \frac{d\delta_x}{dx}\right) = dV_0 \cdot (1 + \delta'_x)$$

Bár a térfogat megváltozott, nem változott meg a kockában lévő elemek száma, így a sűrűség a következőképpen fejezhető ki:

$$\rho = \frac{dm}{dV} = \frac{dm}{dV_0} \cdot \frac{1}{1 + \delta'_x}$$

Alkalmazva Newton második törvényét a megmozdult elemi tömegre:

$$dm \cdot \ddot{\delta}_x = -dP_x \cdot A = -\frac{\partial P}{\partial x} \cdot dx \cdot A, \text{ ahol } dx \cdot A = dV \rightarrow \rho_0 \cdot \ddot{\delta}_x = -P'$$

$$P' = \frac{\partial P}{\partial \rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial \delta_x} \quad \text{összefüggés alapján:} \quad \ddot{\delta}_x = -\frac{P'}{\rho_0} = -\frac{\partial P'}{\partial \rho} \cdot \frac{\rho'}{\rho_0} = \frac{\partial P'}{\partial \rho} \cdot \frac{\delta''}{(1+\delta_x)^2}$$

Akusztikus határok között elmondhatjuk, hogy  $\delta'_x \ll 1$ , így a differenciálegyenlet a következőképpen egyszerűsödik:

$$\ddot{\delta}_x = \frac{\partial P}{\partial \rho} \Big|_{\rho_0} \delta''_x, \quad (1.1.)$$

melynek megoldása:  $\delta_x(x, t) = \Re \left\{ \delta_{x0} e^{j(k \cdot x - \omega \cdot t + \Phi)} \right\}$ ,

$$\text{és a hozzá tartozó fázissebesség: } v_p = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{\partial P}{\partial \rho} \Big|_{\rho_0}} \quad (1.2.)$$

Most egy másik megközelítésben vezetem le az egyenletet.

A nyomás és a térfogat megváltozása közti kapcsolatot a Bulk-állandó teremti meg.

$$dP = P = -B \cdot \frac{dV}{V} = -B \cdot \frac{d\delta_x dydz}{dx dy dz} = -B \cdot \delta'_x, \text{ ahol } B \text{ a Bulk-modulus} \quad (2.)$$

Képezzük az egyenlet idő szerinti második deriváltját:

$$\ddot{P} = -B \cdot \ddot{\delta}'_x = \frac{B}{\rho_0} \cdot P'' \quad (3.1.)$$

Itt felhasználtam a  $\rho_0 \cdot \ddot{\delta}_x = -P'$  összefüggést.

$$\text{Ezen differenciálegyenlethez tartozó fázissebesség: } v_p = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}} \quad (3.2.)$$

Mivel mind a két megközelítésben nyert differenciálegyenlet ugyanazt a jelenséget írja le, a két

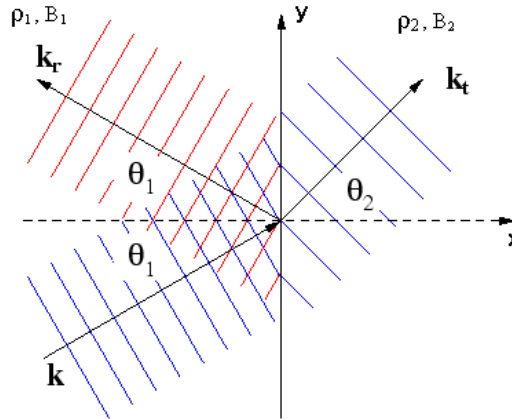
fázissebességnek azonosnak kell lennie (1.2. és 3.2. egyenlet):  $\frac{\partial P}{\partial \rho} \Big|_{\rho_0} = \frac{B}{\rho_0}$

Végezzünk el egy részszámítást:

$$\delta'_x(x, t) = \Re \left\{ \delta_{x0} j k e^{j(k \cdot x - \omega \cdot t + \Phi)} \right\} = -\delta_{x0} k \sin(kx - \omega t + \Phi)$$

Ezt behelyettesítve a 2. egyenletbe,  $P = -B \cdot \delta'_x = B \delta_{x0} k \sin(kx - \omega t + \Phi)$  összefüggést kapjuk, ahol  $B \delta_{x0} k = P_0$ . Látható, hogy az eltolódási hullám, és a nyomáshullám fázisa között 90 fok van.

Reflexiók



22. ábra. Közeghatárra beeső, reflektálódó, és továbbhaladó hullámok

Képzeljünk el két közeget, melyek a y tengely mentén határolják egymást. Az akusztikus hullámokat a k hullámszámvektorukkal jellemzem. Így k a beérkező, k<sub>r</sub> a visszavert (reflektált), k<sub>t</sub> a továbbhaladó (transzmittált) hullám. A frekvenciák megegyeznek mindkét oldalon. A transzmittált hullámot a beeső hullám oszcillációja gerjeszti.

Mivel a y tengely mentén semmilyen anyagi változás nem történik, és a bal félsíkon azonosak a frekvenciák :

$$|k|=|k_r| \quad , \quad k_x = -k_{rx} \quad , \quad k_y = k_{ry}$$

A nyomáshullám függvénynek folytonosnak kell lennie, hogy kielégítse a hullám egyenletet. A közegethatárt vizsgálva, és  $t=0$  ,  $\phi=0$  feltétellel a következő összefüggés írható:

$$P(0, y, 0, 0) + P_r(0, y, 0, 0) = P_t(0, y, 0, 0)$$

$$P_0 \cdot e^{jk_y y} + P_{r0} \cdot e^{jk_{ry} y} = P_{t0} \cdot e^{jk_y y}$$

$$(P_0 + P_{r0}) \cdot e^{jk_y y} = P_{t0} \cdot e^{jk_y y}$$

Az egyenlőség csak akkor állhat fenn minden y-ra, ha a kitevők megegyeznek  $k_y = k_{ty}$  .

$$k_y = k_{ty} \rightarrow k \cdot \sin(\Theta_1) = k_t \cdot \sin(\Theta_2) \quad \rightarrow \quad \frac{\sin(\Theta_1)}{v_1} = \frac{\sin(\Theta_2)}{v_2} \quad ,$$

$$\text{és} \quad P_0 + P_{r0} = P_{t0} \tag{4.}$$

Hasonlóan az eltolódási függvénynek is folytonosnak kell lennie, így az eltolódások normálisaira a következő összefüggés írható:

$$\delta_{x0} + \delta_{rx0} = \delta_{tx0} \tag{5.}$$

Az előzőekben előállított  $\rho_0 \cdot \ddot{\delta}_x = -P'$  egyenlet alapján, a deriválásokat elvégezve, és három dimenzióra általánosítva:

$$\rho_0(-\omega^2)\delta_x(\vec{r}, t) = -jk_x p(\vec{r}, t) \rightarrow \delta_x(\vec{r}, t) = \frac{jk_x}{\rho_0\omega^2} \cdot p(\vec{r}, t) \quad \text{j-vel való beszorzás, és valós rész}$$

képzés után:

$$\delta_{x0} = \frac{k_x}{\rho_0\omega^2} \cdot p_0 \quad (6.)$$

Felhasználva a  $k_x = -k_{rx}$  összefüggést és az 6. egyenletet, a 5. egyenlet a következő alakra hozható:

$$\frac{k_x}{\rho_1\omega^2} \cdot (p_0 - p_{r0}) = \frac{k_{rx}}{\rho_2\omega^2} \cdot p_{t0} \rightarrow k \frac{\cos(\Theta_1)}{\rho_1\omega^2} \cdot (p_0 - p_{r0}) = k_t \frac{\cos(\Theta_2)}{\rho_2\omega^2} \cdot p_{t0} \quad (7.1.)$$

Vezessük be az akusztikus impedanciát:  $Z = \sqrt{\rho \cdot B}$ , ahol  $Z$  az akusztikus impedancia .

$$\text{Végezzünk el egy segédszámítást: } \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \rightarrow k = \omega \cdot \sqrt{\frac{\rho}{B}} \rightarrow \frac{\rho}{k} = \omega \cdot \sqrt{\rho B} = \omega Z$$

Ezt felhasználva a 7.1. egyenlet alakja:

$$p_0 - p_{r0} = \frac{\cos \Theta_2}{\cos \Theta_1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \cdot p_{t0} = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{\sec \Theta_1}{\sec \Theta_2} \cdot p_{t0} \quad (7.2.)$$

A 4-es és a 7.2-es egyenletet összeadva, elvégezve a szükséges átalakításokat:

$$\frac{p_{t0}}{p_0} = \frac{2Z_2 \sec \Theta_2}{Z_1 \sec \Theta_1 + Z_2 \sec \Theta_2} = T, \text{ ahol } T \text{ a transzmissziós tényező}$$

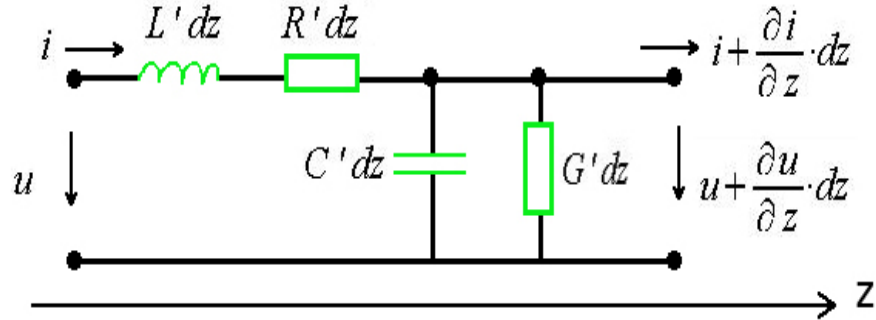
$$R = \frac{p_{r0}}{p_0} = \frac{p_{t0} - p_0}{p_0} = T - 1 = \frac{Z_2 \sec \Theta_2 - Z_1 \sec \Theta_1}{Z_2 \sec \Theta_2 + Z_1 \sec \Theta_1}, \text{ ahol } R \text{ a reflexiós tényező}$$

Speciális esetben, ha a határfelületre a hullám merőlegesen érkezik:

$$\Theta_1 = \Theta_2 = 0 \rightarrow R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{és} \quad T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

### Távíró egyenlet

A távvezeték egy elemi szakaszát koncentrált paraméterű kétkapuként kezelve (23. ábra) , az elemi szakaszra felírható egy hurok és egy csomóponti egyenlet.



23. ábra. Koncentrált paraméterű kétkapu, Z a teljesítmény terjedésének iránya.

$$u = L' dz \dot{i} + R' dz i + u + \frac{\partial u}{\partial z} \cdot dz \rightarrow \frac{\partial u}{\partial z} = -L' \dot{i} - R' i \quad (\text{hurok egyenlet})$$

$$i = C' dz \dot{u} + G' dz u + i + \frac{\partial i}{\partial z} \cdot dz \rightarrow \frac{\partial i}{\partial z} = -C' \dot{u} - G' u \quad (\text{csomóponti egyenlet})$$

Differenciáljuk az első egyenletet z szerint, és helyettesítsük bele  $\frac{\partial i}{\partial z}$  -t:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} &= -L' \cdot \frac{\partial \dot{i}}{\partial t \partial z} - R' \cdot \frac{\partial i}{\partial z} = -L' \frac{\partial}{\partial t} \cdot (-C' \dot{u} - G' u) - R' \cdot (-C' \dot{u} - G' u) = \\ &= L' C' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (L' G' + R' C') \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + R' G' u \end{aligned}$$

A második egyenlet is hasonló alakra hozható. Ideális távvezeték esetén, amikor G' és R' elhanyagolhatóak a reaktanciák mellett:

$$u'' = L' C' \cdot \ddot{u} \quad \text{és} \quad i'' = C' L' \cdot \ddot{i}$$

Áttérve a komplex formalizmusra:

$$\frac{d^2 U}{dz^2} = (j\omega)^2 \cdot L' C' \cdot U \rightarrow$$

$$\rightarrow U'' - (j\omega)^2 \cdot L' C' \cdot U = 0, \text{ ahol } U \text{ a feszültség komplex csúcserőértéke}$$

Ennek az egyenletnek a megoldása:

$$U = U_1 e^{-\gamma z} + U_2 e^{+\gamma z}, \quad \gamma^2 = (j\omega)^2 L' C', \text{ ahol } \gamma: \text{terjedési együttható}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega \sqrt{L' C'} \rightarrow \beta = \omega \sqrt{L' C'} \text{ és } \alpha = 0$$

A hullám fázissebessége:  $V_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L' C'}}$

A távvezeték hullámimpedanciája:  $Z_0 = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$  *ideális távvezeték*  $Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$   
 →→→→→→→→

Analógia

**11. táblázat** Akusztikus és elektromágneses hullám analógiája. A távvezetésekre és az akusztikus hullám terjedésének közegére jellemző paraméterek a táblázatban adott módon megfeleltethetők egymásnak. Z a távvezeték lezáró impedancia, Z1 és Z2 a határos közegek akusztikus impedanciája.

	Hanghullám	Elektromágneses hullám
Diff. egyenlet	$\ddot{p} = \frac{B}{\rho_0} \cdot p''$	$\ddot{U} = \frac{1}{L'C'} \cdot U''$
Közegjellemző 1	B	$\frac{1}{C'}$
Közegjellemző 2	$\rho$	L'
Reflexiós tényező	$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$	$R = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$

Az analógiát felhasználva, a már létező távvezeték szimulátorokon, kis módosításokkal szimulálni lehetne az akusztikus hullám terjedését egy elektronikai alkatrészen.

## 8. Összefoglalás

Dolgozatomban bemutattam, hogy milyen a pásztázó akusztikus mikroszkóp gyakorlati alkalmazása. Részletesen leírtam egy vizsgálat menetét, melynek különös fontosságot tulajdonítok, mivel kutatásaim során sem könyvekben, sem az interneten nem találtam hasonló témájú cikket. Ehhez szükséges tapasztalataimat egy Bosch szakemberrel történő szóbeli konzultáció során szereztem, és fontosnak tartottam dokumentálni. Kimerítően foglalkoztam a réteghatár szkennelési technikával, mely a legelterjedtebb képalkotási mód, és munkám során legtöbbször én is ezt alkalmazom. Ezen kívül kitértem más képalkotási módokra is. Kiemeltem azokat a hibákat, melyek meghatározásában a berendezésnek nem akad versenytársa. Ezek a mikrorepedések, légzárványok, és delaminációk. Írtam arról, hogy a különböző technikákkal ezek hogyan detektálhatók, az elkészült képet hogyan kell értelmezni. Delamináció jelenlétére az A-szkennen invertált fázis, a képen határozottan világos terület utal. Felderítésükre réteghatár szkennelési technikát alkalmaztam. Több képem is bemutatja ezt a hibát. Légzárványok hasonló módon detektálhatók, általában tömb szkennelési technikával. A teljesség igénye nélkül írtam más akusztikus mikroszkópokról is. Röviden ismertettem a gyakori lencsetípusokat, mivel fontosnak tartom a különböző típusok előnyeinek, hátrányainak ismeretét, és a mikroszkóp alkalmazásától függően a lencse helyes megválasztását. A matematikai összefoglaló megkönnyíti az akusztikus képalkotás fizikai hátterének megértését. A bemutatott analógia az elektromágneses hullám terjedésével lehetőséget biztosít más irányú munkák megkezdésére. A már létező távvezeték szimulátorokat módosítva az ultrahang terjedését szimuláló programot lehetne készíteni. Munkám során elkészült képekből kiválogattam a legtanulságosabbakat és azokat, melyek a legjobban sikerültek. Ezeket szerkesztettem bele dolgozatomba. Saját vizsgálataim eredményeivel is azt támasztottam alá, hogy a berendezésnek méltó helye van az elektronikai hibaanalitikában.



## **9. Köszönetnyilvánítás**

Szeretnék köszönetet mondani Kovács Róbertnek, aki segített a röntgenképek elkészítésében. Ezúton köszönöm a Bosch-nak, hogy rendelkezésemre bocsátotta a mintákat. Köszönet illeti a tanszéket is, mert lehetővé tette nekem a berendezések használatát. Köszönöm Balogh Bálintnak, hogy bevezetett, és a mai napig kalauzol az elektronikai technológia szakterületén.

## 10. Irodalomjegyzék

- [1] Perry L. Martin : Electronic Failure Analysis Handbook, 7. fejezet, McGraw-Hill, 1999
- [2] Advances in Acoustic Microscopy, 1. kötet, szerkeztette Andrew Briggs, Plenum Press, New York, 1995
- [3] Lewis A. Riley : The Wave Equation, Ursinus College,  
<http://webpages.ursinus.edu/lriley/courses/p212/lectures/node17.html>, 2003-2004,  
letöltés dátuma: 2007. július
- [4] Fodor György : Elektromágneses Terek, Műegyetemi kiadó, 2005
- [5] Joint Industry Standard, Acoustic Microscopy for Nonhermetic Encapsulated Electronic Components, IPC/JEDEC J-STD-035 MAY 1999,  
<http://www.sonoscan.com/images/jstd35.pdf>, letöltés dátuma: 2007. október