



Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

TDK dolgozat

Hőmérsékleti tranziens görbe nagy pontosságú
előállítására termikus tranziens mérés és
szimuláció segítségével

Szerző

Szél Attila - BME-VIK 4. évfolyam

Témavezetők

Tanszéki konzulens: Dr. Ress Sándor - BME-EET, e. docens

Vállalati konzulens: Vass-Várnai András - Mentor Graphics

Tartalom

Tartalom	1
Összefoglalás.....	2
Abstract	4
1. Bevezetés.....	5
2. Irodalmi áttekintés.....	6
2.1. Villamos - termikus rendszerek analógiája	6
2.1.1 Villamos rendszerek leírása	6
2.1.2. Termikus rendszerek leírása	7
2.2. A termikus tranziens mérés technikai alapjai	8
2.3. Termikus ellenállás matematikai leírása.....	11
2.4. Termikus tranziens mérés leírása	12
2.5. Az érzékenység kalibrálása	13
2.6. Az elektromos tranziens	14
3. Felhasznált eszközök, módszerek.....	16
4. Kidolgozott eljárás	17
4.1. Die source és die attach rétegek vizsgálata	18
4.1.1. Méret vizsgálat	18
4.1.2. Anyagi paraméterek vizsgálata	23
4.2. Az iparban alkalmazott elektromos tranziens kiszűrési módszerek	24
4.3. Hőmérsékleti tranziens görbe korrekció szimuláció segítségével	26
4.4. Early Transient Simulator program alkalmazása.....	31
4.5. Az eljárás verifikálása komplex IGBT eszközön	34
5. Eredmények értékelése, jövőbeni tervek.....	39
6. Irodalom jegyzék.....	40
7. Ábrajegyzék	41

Összefoglalás

Napjainkban az elektronikai ipar nagyütemű fejlődése miatt az elektronikus eszközökön rohamos méretcsökkenés ment végbe. Viszont az eszközök teljesítményfelvétele nem változott, így az eszközök melegedési problémájának megoldása gyorsan a középpontba került. Másrészt az elektronikus eszközök alkatrész sűrűsége is nagymértékben megnőtt, emiatt az eszközön belüli teljesítmény sűrűségek is jelentősen megemelkedtek. Az iparban így fontos szerepet kapott az eszközök termikus viselkedésének a vizsgálata, hűtésük minden eddiginél gondosabb tervezést igényel. Az elektronikus eszközök termikus mérésének azonban több nehézsége is akad, mivel a tervezők általában a termikus tesztelhetőségre való tervezést nem kezelik elsődleges szempontként.

A szakmai gyakorlatom során megismerkedtem egy olyan mérési módszerrel, mely képes megmérni egy félvezető átmenet melegedésének időfüggését, a félvezető saját elektromos paramétereinek hőfüggését felhasználva. Az elkészült mérésből számítással képezhető egy ú.n. struktúra függvény, mely a termikus rendszert egy hőellenállás-hőkapacitás hálóval írja le.

Sajnos a hőmérsékleti tranziens görbe elején minden esetben egy elektromos hatás figyelhető meg, mely a műszer két teljesítmény szintje közötti kapcsoláskor jelenik meg. Ez az elektromos tranziens eltakarja a termikus tranziens kezdeti szakaszát, mely ismerete nélkül az eszköz pontos hőmérséklete nem határozható meg. Az iparban elterjedt módszerek általában egyszerű vágással korrigálják a termikus mérés első szakaszát, ez pontatlan, valamint a korrekció manuális lépést igényel és emiatt bizonytalan.

A TDK munkám célja kidolgozni egy olyan módszert, mely megmutatja, hogy érdemes a mért görbét korrigálni úgy, hogy a valósághoz legközelebb álló eredményt kapjuk. Ezt a problémát a hiányzó termikus tranziens szakasz szimulációjával, valamint ennek a mért görbéhez való illesztésével közelítettem meg. Azt tudjuk, hogy a mért görbénk második fele biztosan a valóságot tükrözi. Így feltételezhetjük - ha a mérést a megfelelő peremfeltételek mellett szimuláljuk - hogy a mért eredménnyel megegyező válaszfüggvényt kell kapjunk. Szimuláció esetén természetesen nincs elektromos tranziens, így megvizsgálhatjuk, hogy mi történt az eszközzel a mérés azon időtartományában, melyet nem láttunk. Ha az így kapott szimulációs görbét és a mért görbét összeillesztjük a megfelelő helyen, akkor kapunk egy olyan kombinált válaszfüggvényt, melynek kezdeti szakasza a szimulációs görbe elejével, míg a másik fele a mért görbével egyezik meg.

A szimuláció elvégzéséhez elegendő az eszköz geometriai felépítésének és az alkalmazott anyagok ismerete.

Ezt az elvet a TDK munkám során sikerült kísérletileg igazolnom.

Abstract

Recently the rapid size reduction of electronic devices have taken place due to the high pace of development in the electronics industry. However, the power consumption of devices has not changed, so solving the thermal issues has become increasingly important. Secondly, the number of components in the electronic devices are greatly increased, therefore the power densities have also substantially increased. For this reason, monitoring the thermal behavior of devices got an important role, cooling should be planned more carefully than ever before. However, the thermal measurement of electronic devices there is more difficult because the design for thermal testability is still not a top priority.

I became familiar with a measurement method during my internship, which can measure the temperature rise of a semiconductor in time using the device's electric parameters only. From the completed measurement we can calculate a so-called structure function, which describes the thermal system by a thermal resistance-heat capacity model.

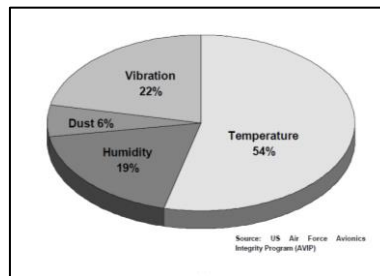
Unfortunately, at the beginning the thermal transient of curve in each case an electric effect can be observed, which appears when switching between two power levels. This electric effect covers the initial phase of thermal transient, and without knowing it the exact temperature of the device can not be determined. The current industrial methods make a simple correction by cutting the first stage of the thermal measurement, but it is inaccurate, and the correction requires manual step, therefore it is uncertain.

My TDK work aims to develop a methodology to accurately reproduce the thermal transient curve. I approached this problem using the combination of thermal transient simulation, as well and fitting the simulated results to the measured curve as we know that the second half of the measured curve certainly reflects the reality. Thus, we can assume – if we can simulate the measure with appropriate boundary conditions – that the response function result has to be same as the measured. When we use simulation there is no electrical transient of course, so we can examine what happened with the device in this interval which we have not seen. If the resulting simulation curve and the measured curve are connected in the right place, you can obtain a combine response function, which has its initial stage equal to the beginning of the simulation curve, while his other half is equal to the measured curve.

Knowing the device's geometry and material properties a simulation model can be prepared easily. This principle has been confirmed experimentally in my TDK job.

1. Bevezetés

Napjainkban az elektronikai ipar nagyütemű fejlődése miatt az elektronikus eszközökön rohamos méretcsökkenés ment végbe. Az eszközön belül az egységnyi felületre integrálható tranzisztorok száma folyamatosan nőtt, emiatt a teljesítmény disszipációs sűrűség is jelentősen megnövekedett. Ezek következtében az eszközök melegedési problémájának megoldása gyorsan a középpontba került.



1.1. ábra Elektronikai hibák főbb okai

A probléma súlyosságát még az is fokozta, hogy az elektronikus eszközök meghibásodásainak fő okai az eszközök hőmérsékleteire vezethetők vissza, amit az 1.1 ábra is mutat [9][12]. Így az iparban az eszközök termikus viselkedésének vizsgálatára nagy hangsúly fordítódott.

Probléma felvetése: A TDK munkám során megismerkedtem egy olyan mérési módszerrel, mely képes elvégezni egy félvezetőn egy termikus karakterizációt, és segítségével meghatározható az eszköz végső hőmérséklete, strukturális leírása, mindez úgy, hogy az eszközt nem kell elemeire bontani. Továbbá a strukturális leírásból meghatározhatók az esetlegesen felmerülő gyártási hibák, azoknak pontos helyei a vizsgált eszközön.

A módszerrel azonban nem határozható meg pontosan a termikus tranziens görbe eleje, mivel a mérés során elektromos tranziens jelenség lép fel, mely eltakarja a termikus tranziens kezdeti szakaszát. Emiatt nem határozható meg pontosan a vizsgált eszköz véghőmérséklete. Ez az elektromos tranziens a műszer két teljesítmény szintje közötti kapcsoláskor jelenik meg. Az iparban egyszerű vágással korrigálják ezt a hibát, de ez manuális beavatkozást igényel, mely pontatlan eredményhez vezet.

Megközelítés: A célom az volt, hogy kidolgozzak egy olyan módszert, mely segítségével visszaállítható a termikus tranziens görbe kezdeti szakasza úgy, hogy a valósághoz legközelebbi eredményt kapjuk. Ezt a problémát a hiányzó termikus tranziens szakasz szimulációjával, valamint ennek a mért görbéhez való illesztésével közelítettem meg.

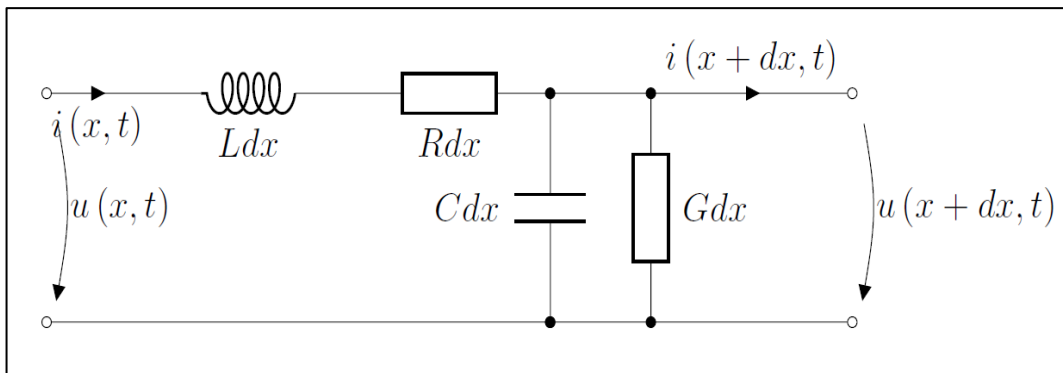
2. Irodalmi áttekintés

2.1. Villamos - termikus rendszerek analógiája

Egy rendszer termikus tranziens analízisének elvégzéséhez sok differenciálegyenlet megoldására lenne szükség, mely így első megközelítésre elég nehéznek tűnhet. Ez a sok differenciálegyenlet elkerülhető, mert szerencsére már van egy jól kidolgozott, matematikailag is alátámasztott analógia a villamos rendszerek és a termikus rendszerek között. Ennek segítségével a termikus rendszerek villamos mennyiségekkel jellemezhetők.

2.1.1 Villamos rendszerek leírása

A villamos rendszer leírásához a távíróegyenletekből indulunk ki [6].

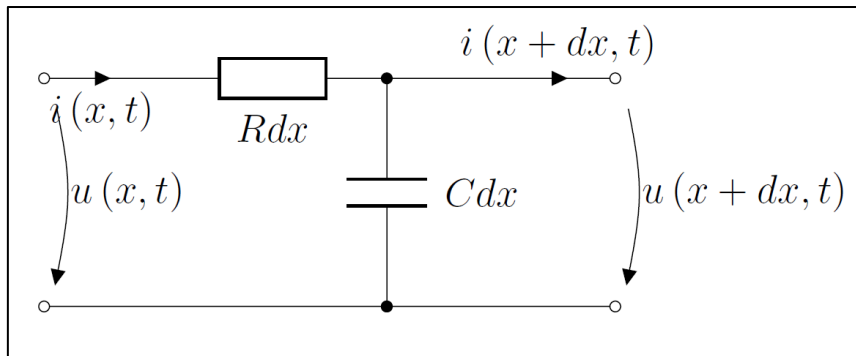


2.1. ábra Távfűteték elemi szakaszának elosztott paraméterű modellje

A távfűteték egy elemi szakaszának elosztott paraméterű modellje látható a 2.1. ábrán [6]. Innen felírhatók a távíró egyenletek:

$$\frac{\partial}{\partial x} u(x, t) = -Ri(x, t) - L \frac{\partial}{\partial t} i(x, t)$$
$$\frac{\partial}{\partial x} i(x, t) = Gu(x, t) - C \frac{\partial}{\partial t} u(x, t)$$

Az $L = 0$, $G = 0$ peremfeltételeket alkalmazva tovább egyszerűsödnek az egyenletek:



2.2. ábra R-C hálózat modellje

$$\frac{\partial}{\partial x} u(x, t) = -Ri(x, t)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} i(x, t) = -C \frac{\partial}{\partial t} u(x, t)$$

A peremfeltételeket alkalmazva kaptunk egy egyszerű R-C hálózatot, amit a 2.2. ábrán is láthatunk.

2.1.2. Termikus rendszerek leírása

Ebben az esetben a hővezetési egyenletből indulunk ki a termikus rendszer tranziensének meghatározásához [6].

$$k \frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x, t) - \rho c \frac{\partial}{\partial t} T(x, t) = 0$$

ahol T a hőmérsékletet, k a termikus vezetőképességet, ρ a sűrűséget, c a fajhőt jelöli.

A Fourier törvény segítségével felírható a hőáram összefüggés:

$$q = -k \frac{\partial}{\partial x} T(x, t)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} q(x, t) - \rho c \frac{\partial}{\partial t} T(x, t) = 0$$

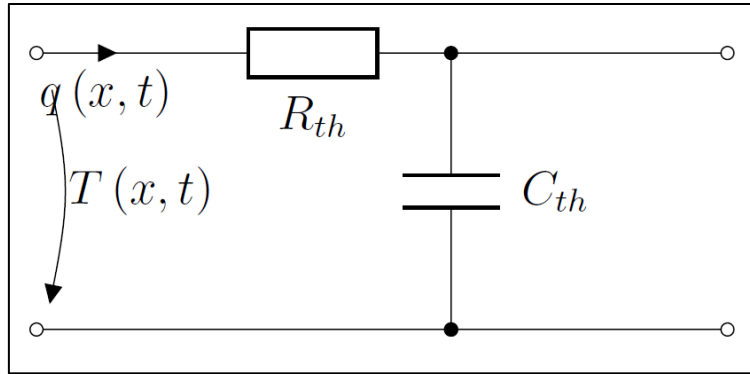
ahol q a hőáramot jelöli.

Ezeket az összefüggéseket rendezve a következő egyenletrendszer adódik:

$$\frac{\partial}{\partial t} T(x, t) = -\left(\frac{1}{k}\right) q(x, t)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} q(x, t) = -(\rho c) \frac{\partial}{\partial t} T(x, t)$$

Ebből az egyenletrendszerből felírható a termikus rendszer modellje:



2.3. ábra Termikus hálózat helyettesítő modellje

$$\frac{\partial}{\partial x} T(x, t) = -R_{th} q(x, t)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} q(x, t) = -C_{th} \frac{\partial}{\partial t} T(x, t)$$

ahol $R_{th} = \frac{1}{k}$, $C_{th} = \rho c$.

Ezek után megfigyelhető a két rendszer közötti analógia [11]:

Villamos rendszer	Termikus rendszer
R	R_{th}
C	C_{th}
u	T
i	q

2.4. ábra Villamos - Termikus analógia táblázat

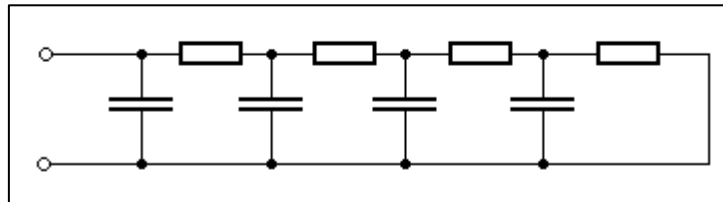
Így a termikus rendszerek modellje visszavezethető egy egyszerű RC hálózat modelljére.

2.2. A termikus tranziens mérés technikai alapjai

Miután megismerkedtünk a két rendszer közötti analógiával áttérhetünk a mérési módszer alapjainak megismerésére. A 2.1. fejezetben megbizonyosodtunk arról, hogy egy termikus rendszer RC hálózattal modellezhető. A félvezetőkben a hőterjedés útvonala háromdimenziós, azonban modell alkotáskor ezt egydimenziósra redukáljuk, így csak azt az útvonalat modellezzük, ahol a hő nagy része távozik (teljesítményeszköz esetén ez a chip, hűtőfelület, hűtőborda útvonal) [5]. A modellünket úgy képzelhetjük el, hogy a vizsgált eszközünket kis térfogategységekre bontjuk fel, melyeket hővezetési és hőtárolási

tulajdonságokkal jellemzünk [4][10]. Ezeket a kis térfogategységeket egy RC hálózattal modellezhetjük, ahol R a térfogategység hőellenállását, C pedig a térfogategység hőkapacitását jelöli [3]. Ezt a legjobban egy Cauer hálózattal tudjuk modellezni (2.5. ábra).

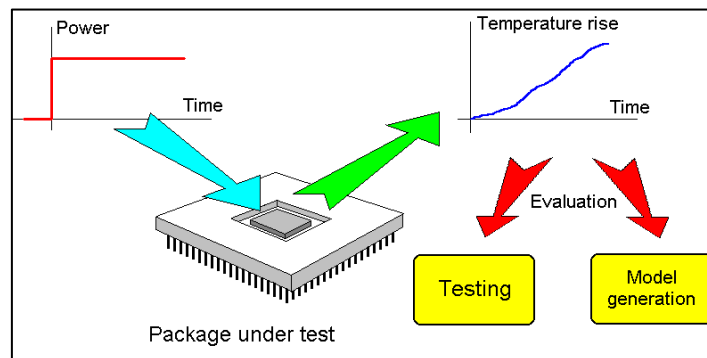
Az elemi hőkapacitások a földre csatlakoznak, azaz a tárolt energia a csomópont és a környezett közötti hőmérsékletkülönbséggel arányos [1]. A csomópontok közötti hőterjedést egy-egy hőellenállással modellezzük.



2.5. ábra Cauer hálózat topológia

Így sikerült az egydimenziós hőterjedési utat koncentrált paraméterű RC hálózattal modellezni [2][6].

A termikus tranziens mérés során állandósult állapotban a vizsgált rendszerre ismert nagyságú teljesítmény egységugrás gerjesztést adunk (2.6. ábra). Ennek hatására a rendszer hőmérséklete változni fog. Ezt a hőmérsékletváltozást mindaddig mérjük, amíg a rendszer be nem áll egy újabb állandósult állapotba, ahol a gerjesztés hatására már nem változik a rendszer hőmérséklete [7].

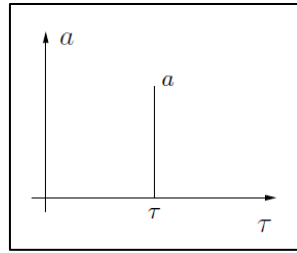


2.6. ábra Eszközvizsgálat

Egy RC kétpólus egységugrás gerjesztésre adott válaszfüggvénye, azaz az átmeneti függvénye a következő:

$$a(t) = R \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

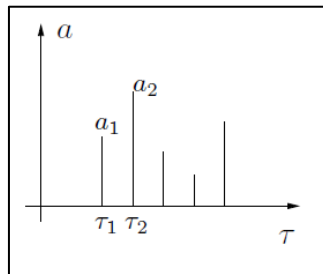
ahol $\tau = RC$ az időállandó.



2.7. ábra RC kétpólus diszkrét időállandó spektrumképe

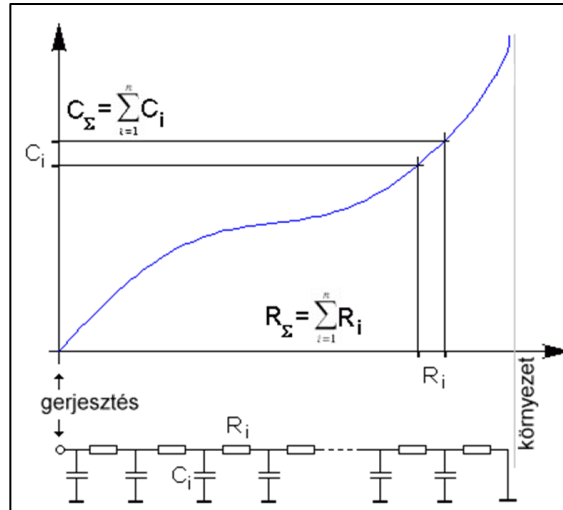
A 2.7. ábrán egy RC kétpólus diszkrét időállandó spektrumképe látható. Egy valódi rendszer esetén az átmeneti függvény több (elméletileg végtelen sok, gyakorlatilag véges számú) időállandójú elemi RC kétpólus válaszfüggvény összegeként épül fel.

$$a(t) = \sum_{i=1}^N R_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right)$$



2.8. ábra Több tagból álló RC hálózat diszkrét időállandó spektrumképe

A mért válaszfüggvényből dekonvolúcióval közelítően meghatározhatóak az időállandók és a hozzá tartozó amplitúdók. Ennek pontos matematikai részletei megtalálhatók [2] hivatkozásban. Az időállandókból és az amplitúdókból egy Foster hálózat képezhető, melyet az előzőekben taglaltak szerint Cauer hálózattá transzformálható. Ha a gerjesztési ponttól kiindulva összegezzük a csomópontok hőellenállását és hőkapacitását, akkor megkapjuk a rendszer kumulatív termikus ellenállását és a kumulatív termikus kapacitását. Ha az egydimenziós hővezetési út hőkapacitását ábrázoljuk a hőforrástól számított hőellenállás függvényében, akkor eredményül a kumulatív struktúra függvényt kapjuk [7].



2.9. ábra Kumulatív struktúra függvény és Cauer topológiája

A 2.9. ábrán látható az egydimenziós hővezetési útvonal Cauer topológia a gerjesztéstől a környezetig, valamint az ábrázolt struktúra függvény. Minden egyes R_i C_i kétpólus párnak meg van a megfelelője a struktúra függvényen. Egy többrétegű struktúra esetén a rétegek különböző termikus tulajdonságaik miatt a struktúra függvényen jól elkülöníthetők az egyes rétegek. Így ezzel a módszerrel nem csak a vizsgált struktúra véghőmérséklete határozható meg, hanem az esetleges struktúrán belüli hibák is feltárhatók.

2.3. Termikus ellenállás matematikai leírása

Egy félvezető eszköz termikus ellenállását a következőképpen definiálhatjuk [8]:

$$R_{JX} = \frac{T_J - T_X}{P_H}$$

ahol R_{JX} : termikus ellenállás a fűtött ponttól a környezetig [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]

T_J : állandósult hőmérséklet a vizsgálat során [$^{\circ}\text{C}$]

T_X : referencia hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]

P_H : eldisszipált teljesítmény az eszközön [W].

A fűtött pont hőmérsékletét a következőképpen lehet definiálni:

$$T_J = T_{J0} + \Delta T_J$$

ahol T_{J0} : az eszköz hőmérséklete a teljesítmény rákapcsolása előtt [$^{\circ}\text{C}$]

ΔT_J : a fűtött pont hőmérsékletváltozása a teljesítmény rákapcsolása után [$^{\circ}\text{C}$].

Az elektromos vizsgálati módszer alkalmazásával bevezethetők további kifejezések:

$$\Delta T_j = K * \Delta TSP$$

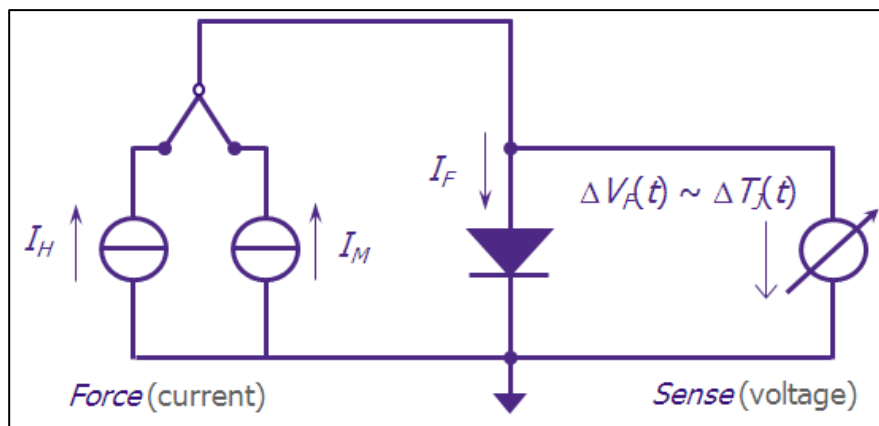
ahol K : konstans, mely definiálja a T_j változás és TSP közötti kapcsolatot [$^{\circ}\text{C}/\text{mV}$]
 ΔTSP : (TSP - Temperature Sensitive Parameter) hőmérséklet érzékeny paraméter változása [mV].

Az adatlapokon a félvezető eszközök termikus tulajdonságával kapcsolatos információk is megtalálhatók. Gyakran megadott érték a félvezetők hőellenállás értéke, ami az aktív rész és egy jól definiált külső tartomány közötti ellenállást jelenti. Annak függvényében, hogy mi a külső tartomány a szakirodalom különböző elnevezéseket határoz meg. Ha a külső tartomány a tokon kívüli környezet, akkor junction-to-ambient termikus ellenállásról beszélünk. Ha pedig a külső tartomány a tok külső felülete, akkor junction-to-case termikus ellenállásról beszélünk [8].

2.4. Termikus tranziens mérés leírása

A mérés során a vizsgált eszközön két teljesítmény szint között kapcsolunk. Az alacsony teljesítmény szint esetén csak néhány mA árammal hajtjuk meg az eszközt. Magas teljesítmény szint esetén, akár az eszközre kapcsolható maximális áram 90%-ával is meghajthatjuk. A 2.10. ábrán látható a mérési elrendezés modellje. Amikor a vizsgált eszközt fűtjük, akkor a kapcsoló a fűtőáramot engedi az eszközre. Mikor elértünk egy új egyensúlyi állapothoz, akkor átkapcsolunk a fűtő áramról és csak a szenzor árammal hajtjuk meg az eszközt. Ekkor meghatározott időként mérjük az eszközön eső feszültséget [7].

A mérést kétféleképpen végezhetjük el. Vagy akkor mérünk, mikor a fűtőárammal hajtjuk meg a vizsgált eszközt, ekkor fűtési mérésről beszélünk, és fűtési görbét kapunk eredményül.



2.10. ábra Termikus tranziens mérés modellje

Vagy akkor mérünk, amikor a szenzor árammal hajtjuk meg a vizsgált eszközt, ekkor hűlési mérésről beszélünk, és eredményül a hűlési görbét kapjuk. A hűlési mérés mérés technikai szempontból előnyösebb, mivel

- lekapcsolás esetén a teljesítményugrás jobban közelíti az egységugrást
- a hőmérséklet-érzékeny paraméter változása kis teljesítményszinten általában nagyobb
- nagy teljesítményen a környezetet sokkal nehezebben tudjuk állandó hőmérsékleten tartani.

2.5. Az érzékenység kalibrálása

Ahogy az előzőekben is láttuk a termikus tranziens mérés során a mért feszültségből számolunk vissza hőmérsékletet. A feszültség különbséget ugyebár a vizsgált félvezető eszközön mérjük, de az eszköz nyitófeszültsége a hőmérséklet hatására megváltozik. Ezért szükségünk van egy olyan konstans meghatározására, mely ezt a változást jól definiálja [8].

A K faktor definíciója:

$$K = \left| \frac{(T_{Hi} - T_{Lo})}{(V_{Hi} - V_{Lo})} \right|$$

ahol T_{Hi} : magas hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]

T_{Lo} : alacsony hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]

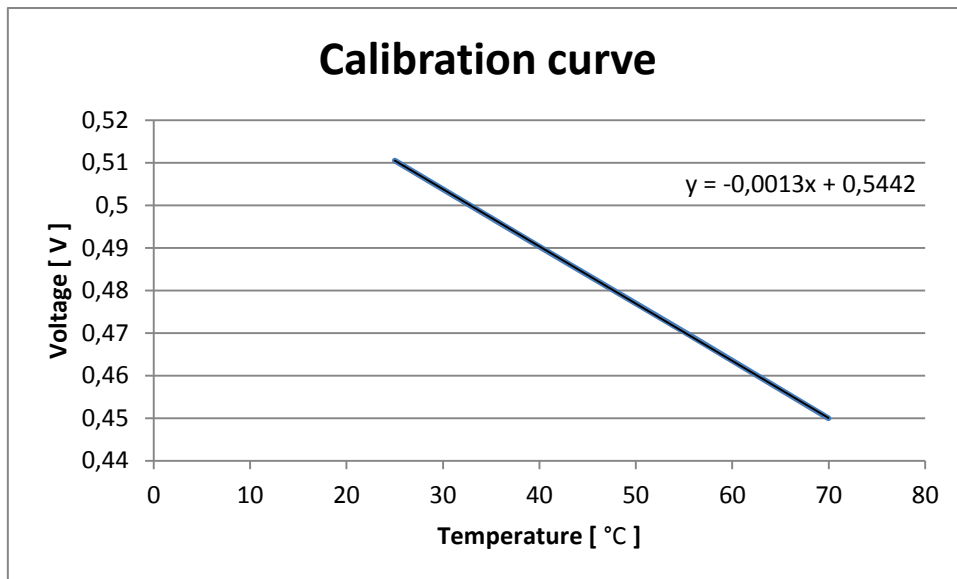
V_{Hi} : megfelelő magas TSP feszültség [mV]

V_{Lo} : megfelelő alacsony TSP feszültség [mV].

A K faktor egy JEDEC szabvány, azonban az iparban ennek reciprokját használják, melyet érzékenységnek neveznek. Az érzékenység meghatározza, hogy a félvezető eszköz nyitófeszültsége 1 $^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletváltozás hatására hány mV-tal változik. Ezt az érzékenységet minden vizsgálni kívánt eszköznél meg kell határozni a termikus tranziens mérés előtt.

A kalibrálás menete:

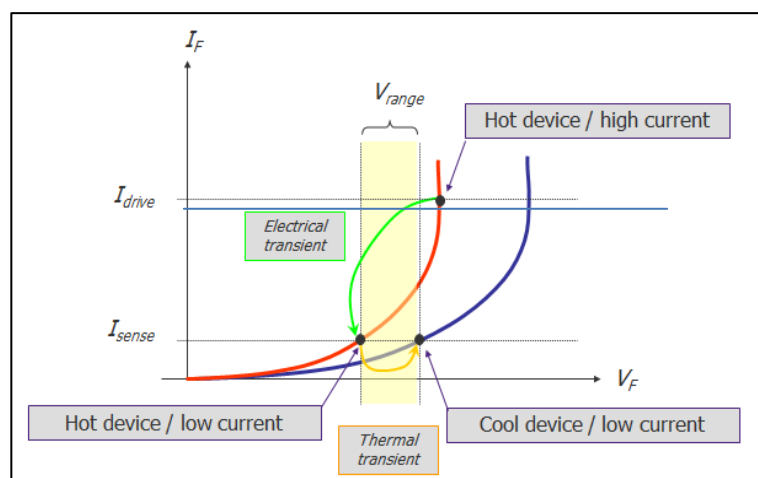
- szenzor áram beállítása (amit hőmérsékleti tranziens mérésnél is használunk)
- eszköz termosztátba helyezése és a kiindulási hőmérséklet beállítása
- hőmérséklet emelése fix lépésközzel
- a feszültség megmérése az adott hőmérsékleten
- a hőmérséklet - feszültség párok ábrázolása
- Érzékenység meghatározása a diagramról



2.11. ábra Kalibrálási görbe

A 2.11. ábrán egy eszköz kalibrálási görbéje látható. A meredekség kiszámolásával meghatározható az érzékenység értéke. Ebben az esetben ez az érték: $1.3 \frac{mV}{K}$

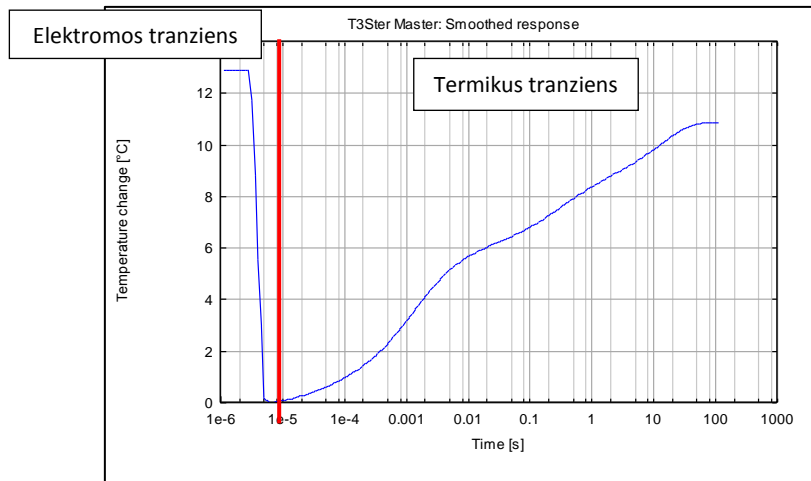
2.6. Az elektromos tranziens



2.12. ábra I-V karakterisztika

Egy termikus tranziens mérés során végbemenő nyitófeszültség változás látható a 2.12. ábrán [7]. Egy eszköznek meghatározható az áram-feszültség karakterisztikája szobahőmérsékleten (kék görbe), valamint egy magasabb hőmérsékleten a piros görbe szerint módosul az eszköz I-V görbéje. A mérés során a kék görbe I_{sense} metszéspontjából indulunk ki. Majd átkapcsolunk a fűtőáramra és fellépünk a kék görbe I_{drive} metszéspontjára. Itt megtörténik az eszköz melegedése, ezáltal átkerülünk a piros görbe I_{drive} metszéspontjára. Ez egy állandósult állapot. Ekkor történik a fűtőáram lekapcsolása, így a piros görbe I_{sense}

metszéspontjára kerülünk. Ennél az átkapcsolási jelenségnél keletkezik az elektromos tranziens, ami eltakarja a termikus tranziens mérésünk kezdeti szakaszát (2.13. ábra). Ennek az információnak a hiányában nem határozható meg pontosan az eszköz véghőmérséklete és a tok pontos belső struktúrája.



2.13. ábra Termikus tranziens görbe

Ezért az iparban különböző módszereket alkalmaznak az elektromos tranziens korrigálására. A mérés után a termikus tranziens görbéből egyszerű vágással eltávolítják az elektromos tranziens és a maradék görbe minimum pontjához egyenest vagy a maradék görbéhez gyökösen görbét illesztnek. Látható, hogy ez az eljárás nem pontos, mivel manuális beavatkozást igényel, valamint a vágással fontos információkat is elhagyunk.

Az egyenes illesztés esetén egy konstans szakaszt illesztünk a görbe minimum pontjához. Ez azért pontatlan, mert a valóságban ez a szakasz nem egy egyenes, hanem egy szigorúan monoton növekedő függvénynek feltételezhető.

Ha egy végtelen kiterjedésű homogén anyag felületét állandó teljesítmény mellett ki/be kapcsolatással fűtjük, akkor kimutatható, hogy a homogén anyag felületi hőmérsékletének emelkedése/csökkenése egyenesen arányos a fűtési/hűlési idő négyzetgyökével.

$$\Delta T(t) = \frac{P_H}{A} k_{therm} \sqrt{t}$$

$$k_{therm} = \frac{2}{\sqrt{\pi c \rho \lambda}}$$

ahol c : fajhő, ρ : sűrűség, λ : termikus vezetőképesség.

A mérésünk kezdetekor a chip belsejében feltételezhető az ilyen módú közelítés. Ezért használják a gyökös illesztést az iparban.

3. Felhasznált eszközök, módszerek

A vizsgált eszközök hőmérsékleti tranziens méréséhez az iparban alkalmazott T3Ster mérőberendezést használtam. Ezt a műszert a Mentor Graphics MicRed csoportja fejlesztette ki, melyet világszerte használnak széleskörű alkalmazhatósága miatt. A T3Ster a 2. fejezetben taglalt méréstechnikai leírás alapján működik. A hőmérsékleti tranziens mérés mellett még a következőkre használható: hőáramlási útvonal rekonstrukcióra, die attach réteg minősítésre, többrétegű die attach és réteges struktúra tanulmányozásra, teljesítmény LED-ek karakterizációjára, roncsolásmentes hibaelemzésre, anyagjellemzők meghatározására, hőmodell ellenőrzésére, valós idejű alkatrész tesztelésére aktív rendszerekben.

A mérés után a T3Ster által felvett mérési eredményt a T3Ster-Master szoftver segítségével lehet feldolgozni. A T3Ster-Masterrel végezhető el az elektromos tranziens kivágása, majd egyenes illesztése a mért görbére. A korrekció elvégzése után lehet kiértékelni az eredményt, mely segítségével újabb görbékhez jutunk. Ilyen görbe például a Smoothed -, a Derivált -, a Z_{th} -, struktúra (integrális) -, struktúra (differenciális) görbe. Ezen függvények birtokában jó jellemzés adható a vizsgált eszközről.

A szimulációk elvégzéséhez a FloTHERM 9.3 szoftvert használtam. A FloTHERM egy 3D-s szimulációs program, mely segítségével a tokon belüli hőátadási folyamatok, valamint a szomszédos eszközök közötti hőátadási folyamatok szimulálhatóak. A szoftverrel lehetőség nyílik gyors, virtuális modell készítésére, melyen termikus szimuláció végezhető akár a tervezés korai szakaszában.

Továbbá az Early Transient Simulator szoftvert is alkalmaztam. Ez a program egy olyan modellt épít fel és szimulál le a FloTHERM-ben, ahol csak a félvezető lapka és az aktív zóna rétegei szerepelnek (4.1. ábra). Azt feltételezzük, hogy ahhoz, hogy megkapjuk a mért görbénk hiányzó kezdeti szakaszát - amit az elektromos tranziens kitakar - ahhoz elég csak ezt a két réteget leszimulálni. Ez a program bemenetként ennek a két rétegnek a fizikai paramétereit kéri, valamint a T3Ster-rel mért mérési eredményt. Ezek segítségével készít egy olyan hibrid görbét, mely görbe eleje a szimuláció során keletkezett eredmény, míg a hibrid görbe vége az eredeti mérésünk. A program a lehető legjobb helyen illeszti a szimulált és a mért eredményt.

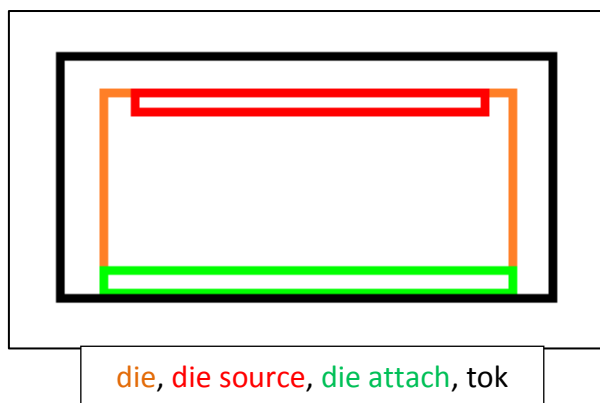
4. Kidolgozott eljárás

A termikus tranziens mérés során nagy gondot okoz az elektromos tranziens jelenléte, hisz a mérés ezen időtartományában kitakarásra kerül a valós, mért eredmény. Ez a jelenség eszközfüggő, de általában a mérés indításától számítva 50-100 μs alatt eltűnik, egy átlagos mérési idő pedig 60-120 sec. Így azt gondolhatnánk, hogy ez az időintervallum a teljes mérési időtartományhoz képest elhanyagolható. Azonban ezen időintervallum eredményeinek hiányában nem határozható meg pontosan az eszköz véghőmérséklete és a tokon belüli struktúra. Emiatt a felhasználó számára fontos hogy a kezdeti szakaszcól is pontos információt kapjon. Ezért az iparban a mérés után a T3Ster-Master szoftverben egy egyszerű vágással eltávolítják ezt a szakaszt és egy minimum vagy gyökös illesztéssel egyenes illesztnek a maradék görbére. Azonban a vágás manuális beavatkozást igényel, így a módszer bizonytalan.

A TDK munkám célja kidolgozni egy olyan eljárást, mely segítségével elvégezhető a korrekció úgy, hogy a kapott görbe a valósághoz legközelebb álló eredményt tükrözze. Fő elgondolásom, hogy szimuláljuk le a hőmérsékleti tranziens görbét, majd kalibráljuk hozzá a mért görbéhez. A kalibráció során addig változtatom a modell egyes rétegeinek az anyagi paramétereit, míg a szimulált görbénk illeszkedni nem fog a mért görbéhez. Ha ez teljesül, akkor kaptunk egy olyan szimulációs modellt, mely ténylegesen a valóságot írja le. Mivel a szimuláció a hőterjedést már a $t = 0$ időponttól kezdve szimulálja és elektromos tranziens nem tartalmaz, így megkapjuk a hőmérsékleti tranziens hiányzó kezdeti szakaszát. Ha ezt a szimulált görbét és a mérés során kapott termikus tranziens görbét a megfelelő helyen összeillesztjük, akkor megkapjuk az ún. kombinált válaszfüggvényt.

Azonban a szimuláció lefuttatásának több nehézségei is van. Mivel a félvezetőket tokozott formában kapjuk meg a gyártó cégtől, így nehézséget okoz a tokon belüli struktúra meghatározása.

Egy általános félvezető tokon belüli struktúrája a következőképpen épül fel:



4.1. ábra Félvezető tokon belüli struktúrája

Die: a félvezető chip, amin az eszközt megvalósították.

Die source: a félvezető aktív zónája, ahol a hő keletkezik.

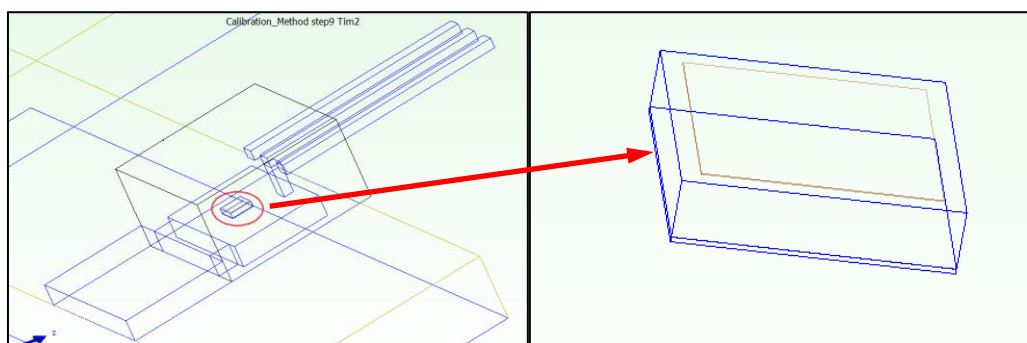
Die attach: az a réteg, amivel a félvezető chip-et a hordozóra rögzítették, ami lehet forrasztás vagy ragasztás

A tok felnyitásával jól becsléssel meghatározható a chip mérete. A kritikus paraméterek a die source és a die attach méretei. Ezért a következőekben a FloTHERM segítségével megvizsgáljuk, hogy ezen rétegek pontatlan megadásával hogyan változik a szimulált eredményünk.

4.1. Die source és die attach rétegek vizsgálata

4.1.1. Méret vizsgálat

A FloThERM-ben felépítettem egy tranzisztor modellt, mely a 4.2. ábrán látható.

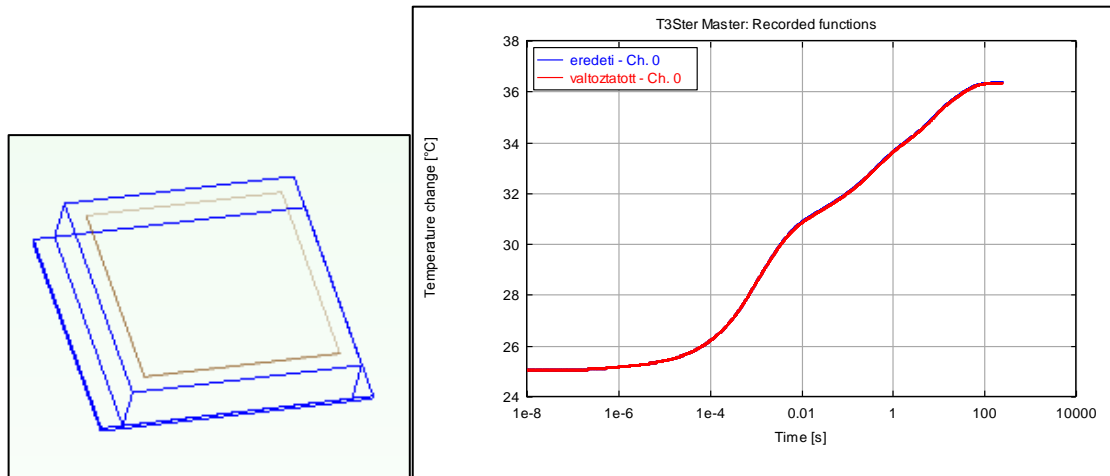


4.2. ábra Tranzisztor FloTHERM modellje

A következőekben ezen a modellen vizsgáltam a die source és a die attach méretfüggését. A használt koordináta rendszer tengely értelmezése a következők:

- X tengely: szélesség
- Y tengely: hosszúság
- Z tengely: vastagság

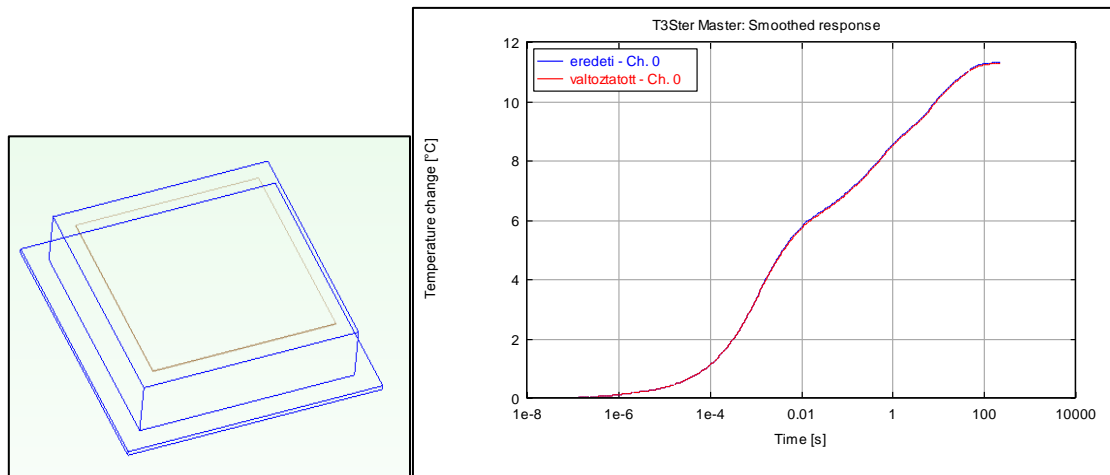
Először a die attach fizikai paraméterét változtattam, mégpedig úgy, hogy az YZ tengely értékeit fixen hagytam és csak X tengely értékét változtattam. Ezzel azt feltételezzük, hogy die attach réteg túlnyúlik a die rétegen.



4.3. ábra Tranzisztoron túlnyúlt die attach I.

Látható, hogy az ilyen irányú változtatás lényegi eltérést nem okozott a szimulált végeredményben.

A következő beállítás esetén a Z tengely értékét hagytam fixen és az XY tengely értékeit módosítottam.

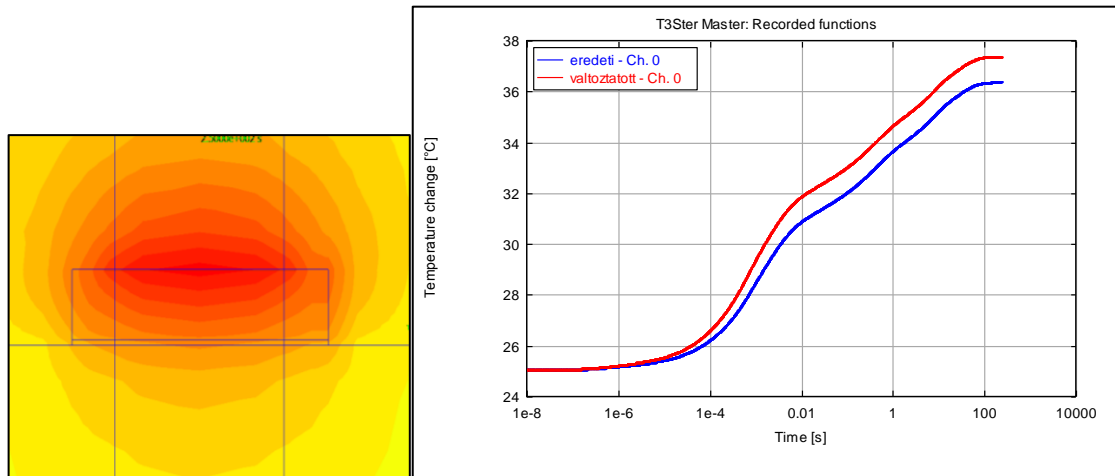


4.4. ábra Tranzisztoron túlnyúlt die attach II.

Látható, hogy ekkora mértékű változtatás sem módosította jelentősen a szimulált eredményt. Ezek az eredmények biztatóak számunkra, mivel belátható, hogy ha a die attach réteg méretét pontatlanul határozzuk meg, attól még nem okozunk jelentős hibát a szimulált végeredményben. Ezzel egy kritikus paramétert kizárhatunk.

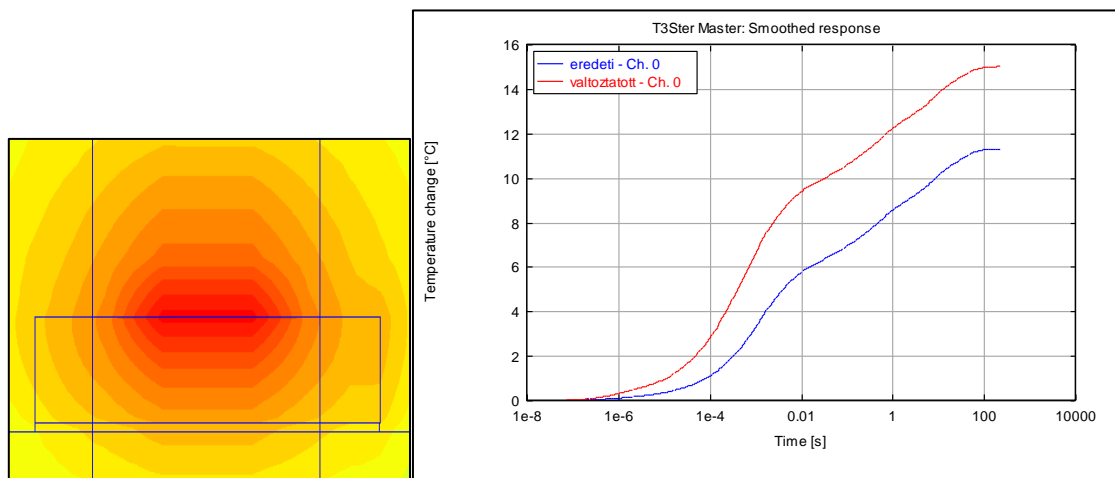
A következő vizsgálat során a die source méretfüggését határoztam meg. A die source réteg méretéről feltételezzük, hogy alapesetben szélessége (X) és hosszúsága (Y) 100-200 μm -

rel kisebb, mint a die réteg szélessége és hosszúsága, míg vastagsága néhány μm -re becsülhető. Először a die source méretét csökkentve vizsgáltam a rendszert úgy, hogy a Z koordinátát fix értéken hagytam, és csak az XY koordinátákat változtattam.



4.5. ábra Tranzisztor die source vizsgálata I.

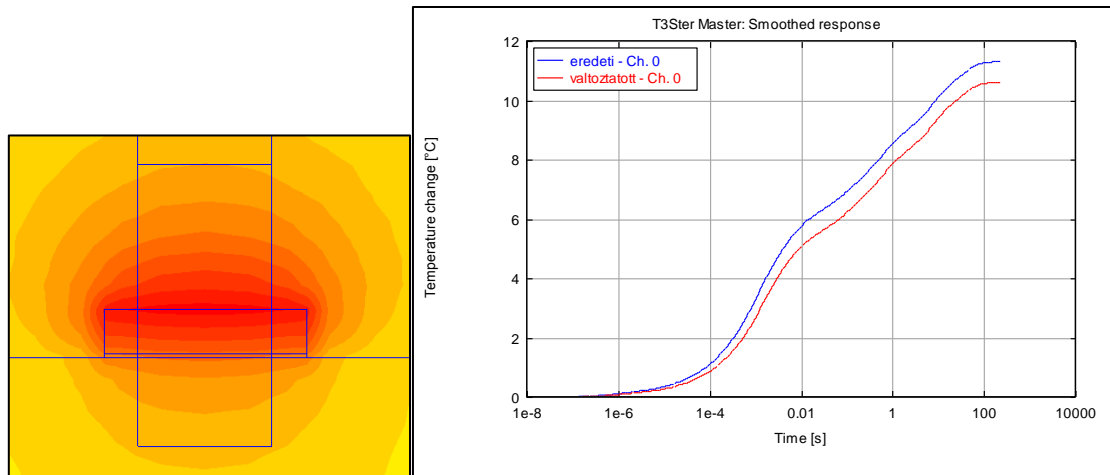
Látható, hogy már kis die source méret csökkenés is jelentősen befolyásolja a szimulált végeredményt. Még további méretcsökkenést is megvizsgáltam.



4.6. ábra Tranzisztor die source vizsgálata II.

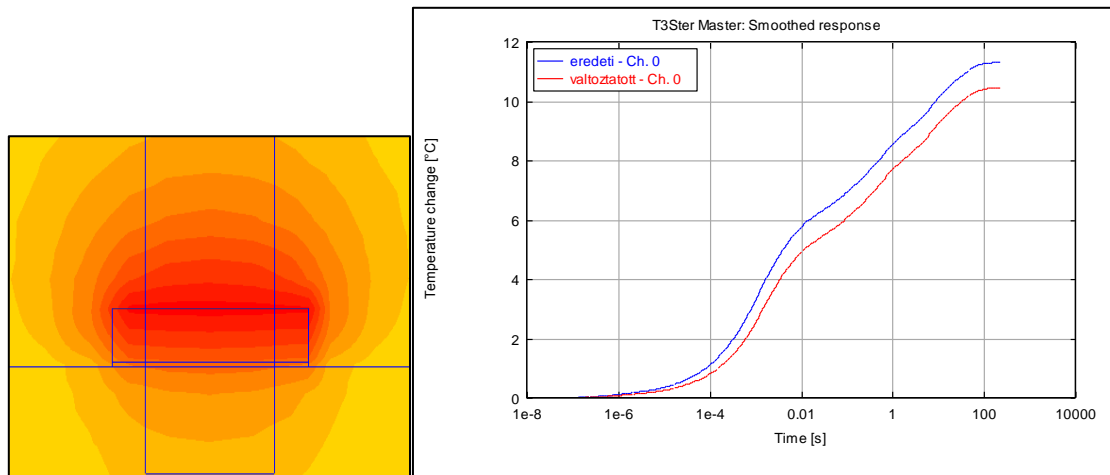
A tok véghőmérséklet tovább emelkedett. Ez azzal magyarázható, hogy a toknak ugyanazt a hőmennyiséget kell elvezetnie minden egyes esetben. Mivel a die source réteg méretét csökkentettük, így kisebb lett a kontaktfelület a die réteg és a die source között. Ezért kisebb felületen tudja leadni ugyanazt a hőmennyiséget a die source. Így a hőmennyiség felhalmozódik a rétegben, és mindezek miatt megnő az eszköz hőmérséklete.

A die source XY méretének csökkentése után megvizsgáltam a rendszert méretnövelés esetén is.



4.7. ábra Transzisztor die source vizsgálata III.

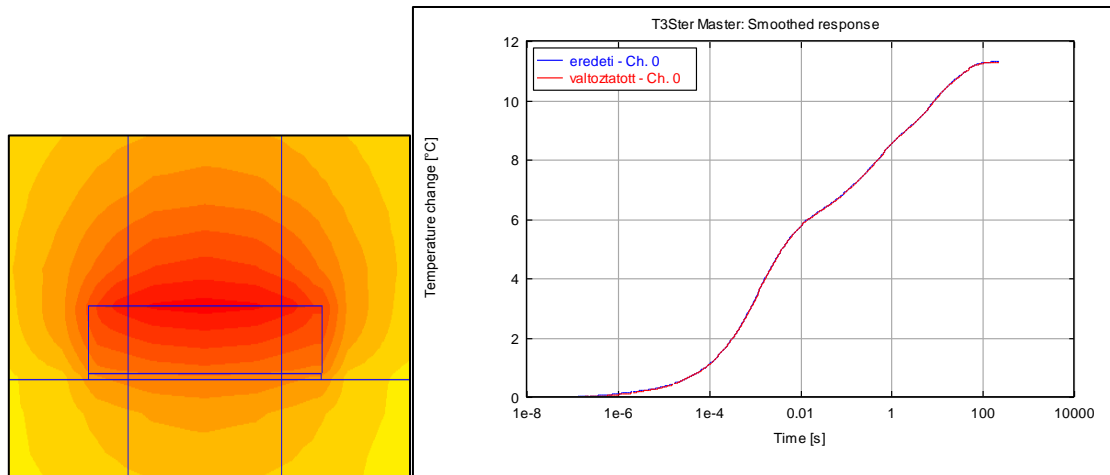
Látható, hogy már kis növelés esetén is csökkent a tok hőmérséklete. Még tovább növeltem a die source réteg méretét.



4.8. ábra Transzisztor die source vizsgálata IV.

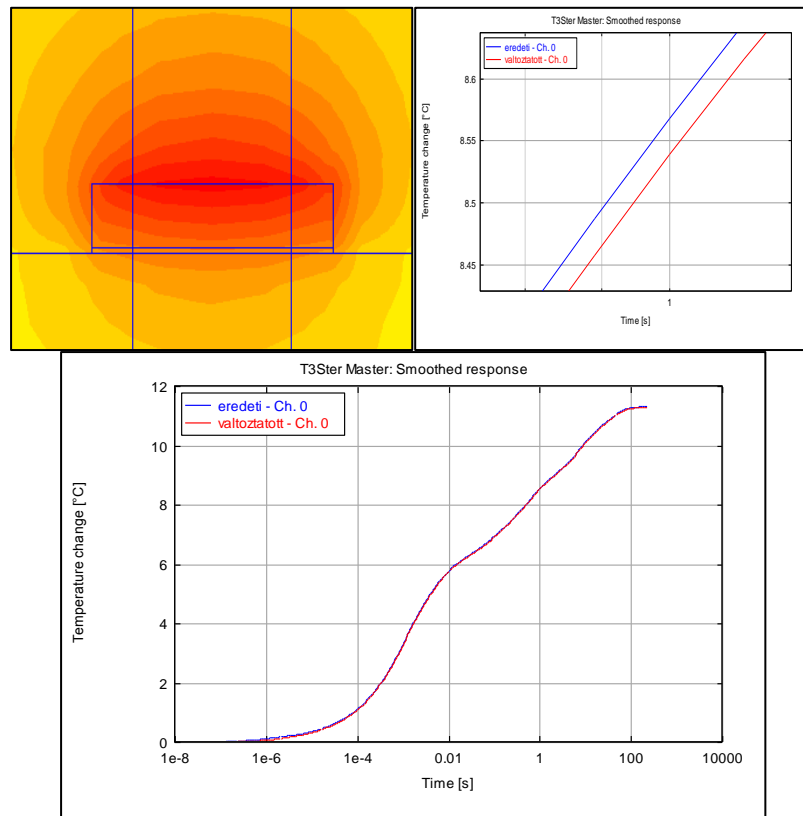
A tranzisztor hőmérséklete még tovább csökkent. Ebben az esetben épp az ellenkezője történik az előzőekben taglaltakkal. Mivel a die source réteg felületét növeltük, így nagyobb lett a kontaktusfelület a die source és a die réteg között. Emiatt most nagyobb felületen tudja leadni ugyan azt a hőmennyiséget a die source. Ezért a rétegből több hőmennyiség tud távozni, mint az előző esetben, ennek eredményeképpen csökken a tok hőmérséklete.

Végül megvizsgáltam a rendszert oly módon is, hogy az XY koordináta értékeket fixen hagytam, és csak a Z koordinátát módosítottam.



4.9. ábra Tranzisztor die source vizsgálata V.

Kismértékű méretváltoztatás nem okozott változtatást az eredményben. Megvizsgáltam a rendszert nagyobb die source vastagsággal is.



4.10. ábra Tranzisztor die source vizsgálata VI.

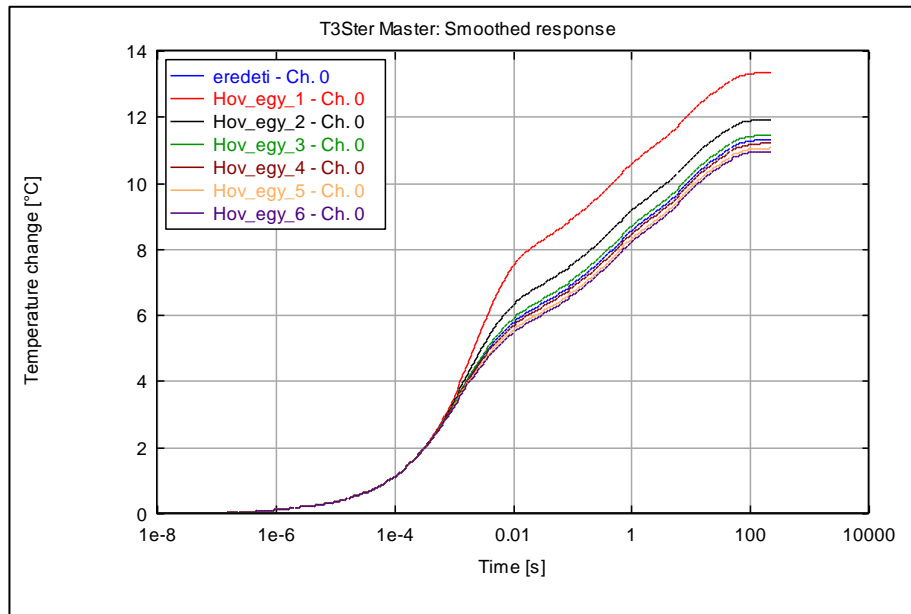
Nagyobb vastagságot feltételezve is csak ezrelékes nagyságrendben észlelhető eltérés.

Összegezve a die source méret vizsgálatot kijelenthető, hogy a Z koordináta (vastagság) értéke nem befolyásolja az eredményünk alakulását, azonban az X koordináta (szélesség) és az Y koordináta (hosszúság) változtatása nagymértékben befolyásolja a vizsgált

eszköz véghőmérsékletét. Tehát az aktív zóna felszíni kiterjedése fontos paraméter, a mélysége kevésbé számít. Így ez a kritikus paraméter nem zárható ki.

4.1.2. Anyagi paraméterek vizsgálata

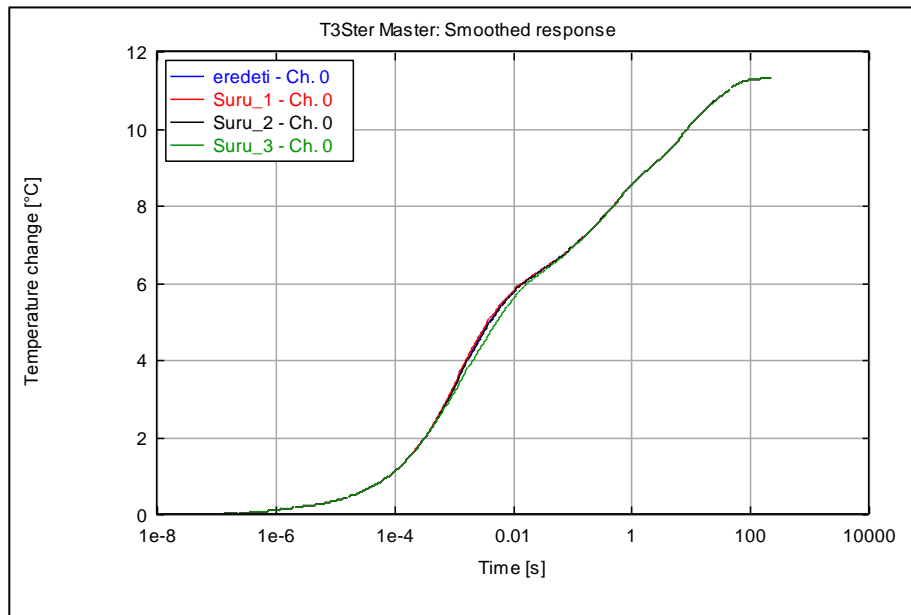
Ebben az alfejezetben röviden bemutatnám, hogy mely anyagi jellemzők dominálnak a szimuláció során.



4.11. ábra Anyagi paraméter vizsgálat I.

A die attach réteg különböző hővezetési együtthatók mellett szimulált eredménye látható a 4.11. ábrán. Ha csökkentem a réteg hővezetési együtthatóját (Hov_egy_1, Hov_egy_2, Hov_egy_3), akkor növekszik a tranzisztor hőmérséklete. Ez azzal magyarázható, hogy ezekben az esetekben a die attach kevésbé vezet jól el a hőt, mint az alap esetben. Ezért ugyanazt a hőmennyiséget nem képes elvezetni a réteg, ezáltal ott hő fog felhalmozódni. Emiatt emelkedni fog a tok hőmérséklete. Míg ha növelem a réteg hővezetési együtthatóját (Hov_egy_4, Hov_egy_5, Hov_egy_6), akkor abban az esetben csökken az eszköz véghőmérséklete, mivel ekkor épp az ellenkezője történik az előzőekben taglaltakkal. A die attach jobb hővezetési képességgel rendelkezik, mint az alap esetben, ezáltal a réteg körül fellépő ugyanakkora mennyiségű hőt jobban el tudja vezetni (többet is el tud vezetni), ezért csökken a tok hőmérséklete. Továbbá az is látható az ábrán, hogy a két eset nem szimmetrikus egymással, azaz a hővezetési együttható növelésével/csökkentésével eltérő mértékben befolyásoljuk a végeredményt. Ez a jelenség azzal magyarázható, hogy nincs tökéletes hővezető anyag, azaz hiába növeljük a hővezetési együtthatót, egy bizonyos határon túl a végeredmény már nem fog változni.

A következőkben megvizsgáltam a réteg sűrűség paraméterének függését. A kapott eredmény a 4.12. ábrán látható.

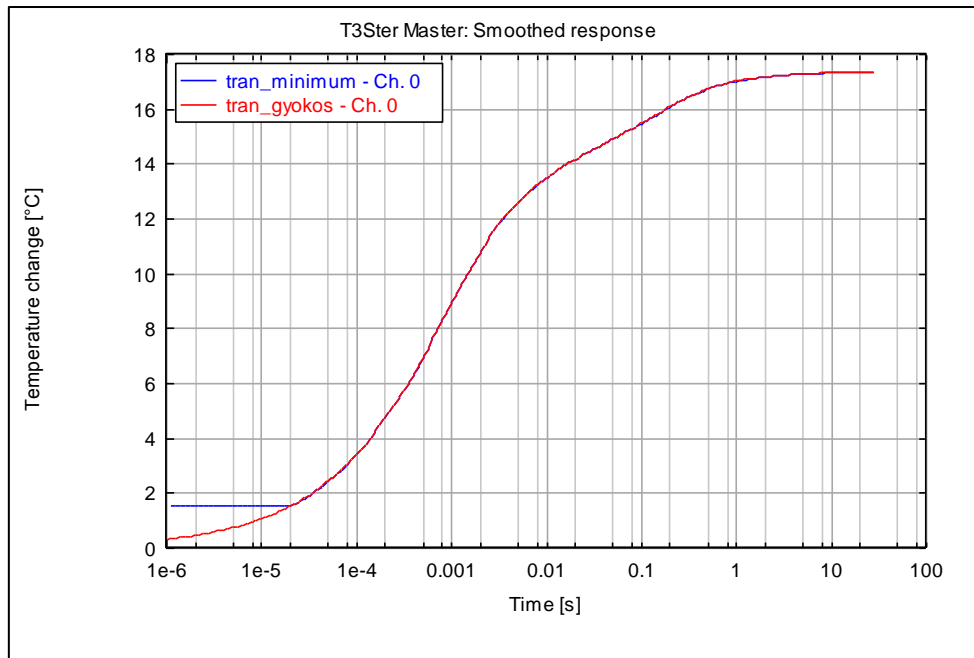


4.12. ábra Anyagi paraméter vizsgálat II.

Jól leolvasható, hogy a die attach sűrűség anyagi paramétere jelentősen nem módosítja a szimuláció végeredményét, mivel a die attach réteg vékony és jó hővezető, viszonylag kis fajlagos hőkapacitású anyagból készül.

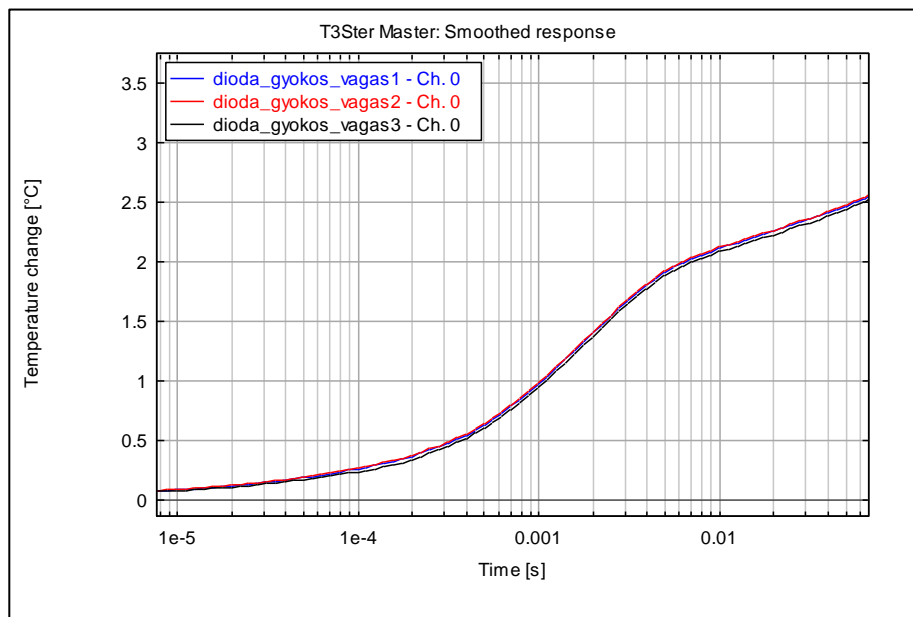
4.2. Az iparban alkalmazott elektromos tranziens kiszűrési módszerek

Az iparban leggyakrabban a már említett T3Ster-Master kiértékelő szoftver segítségével végzik el a tranziens korrekciót. A felhasználó által meghatározott helyen levágják a hőmérsékleti tranziens görbe kezdeti szakaszát, majd a maradék tranziens görbe minimum pontjához egyenest vagy a maradék tranziens görbéhez gyökösen görbét illesztnek, ezáltal határozva meg a termikus tranziens görbe kezdeti szakaszát. Azonban ez manuális beavatkozást igényel a felhasználó oldaláról, így a kapott eredmény pontatlan lesz. A pontatlanság onnan adódik, hogy a vágás helyének meghatározására nincs egzakt módszer. A következőkben bemutatom, hogy mi történik az eredményünkkel kiértékelés után kétfajta vágás esetén, valamint ha két különböző helyen vágjuk meg a görbét.

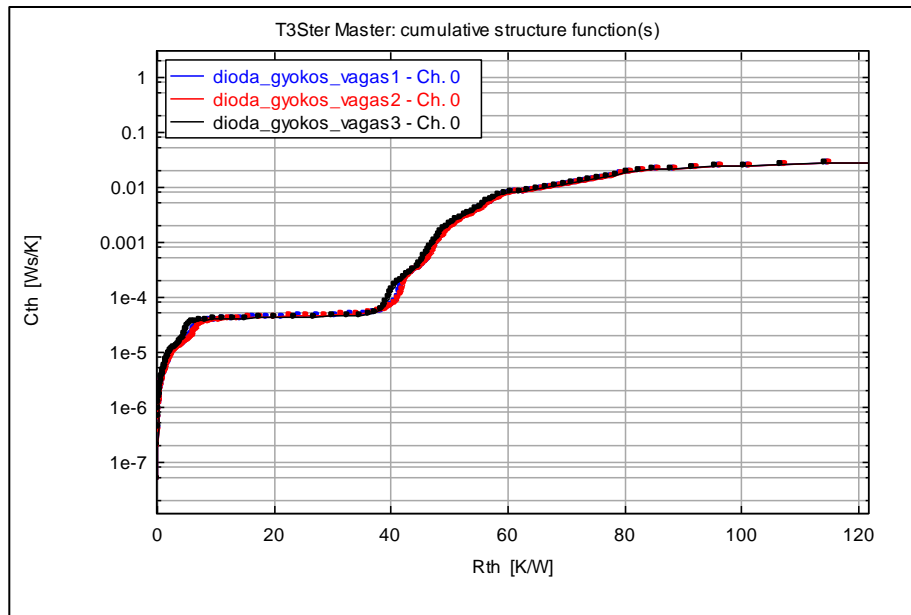


4.13. ábra Minimum - gyökös illesztés

Látható, hogy a két vágás esetén jelentősen különbözik a termikus tranzienstörke kezdeti szakasza. A gyökös illesztés esetén hasonlítottam össze a különböző helyeken megvágott görbétet.



4.14. ábra Gyökös illesztés különböző vágások mellett I.



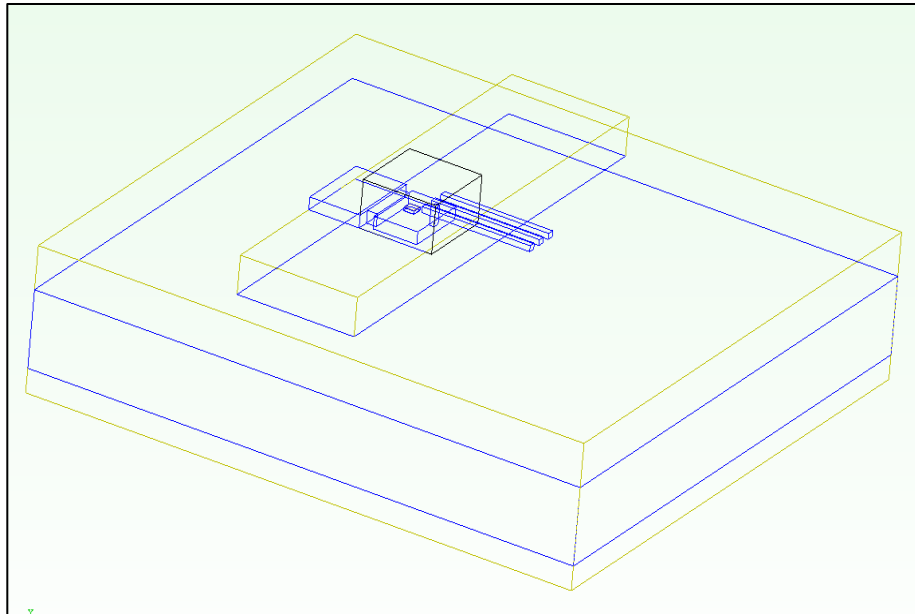
4.15. ábra Gyökös illesztés különböző vágások mellett II.

Még ha a mért tranziens görbén nem is látható jelentős eltérés a különböző vágások esetén (4.14. ábra), addig a struktúra függvény (4.15. ábra) kezdeti szakaszában már észrevehető érdembeli változás. A struktúra függvény kezdeti szakasza mutatja meg a vizsgált eszköz tokon belüli struktúráját. Ezért belátható, hogy fontos szerepe van annak, hogy a felhasználó hol vágja meg a tranziens görbét a kiértékelés előtt.

4.3. Hőmérsékleti tranziens görbe korrekció szimuláció segítségével

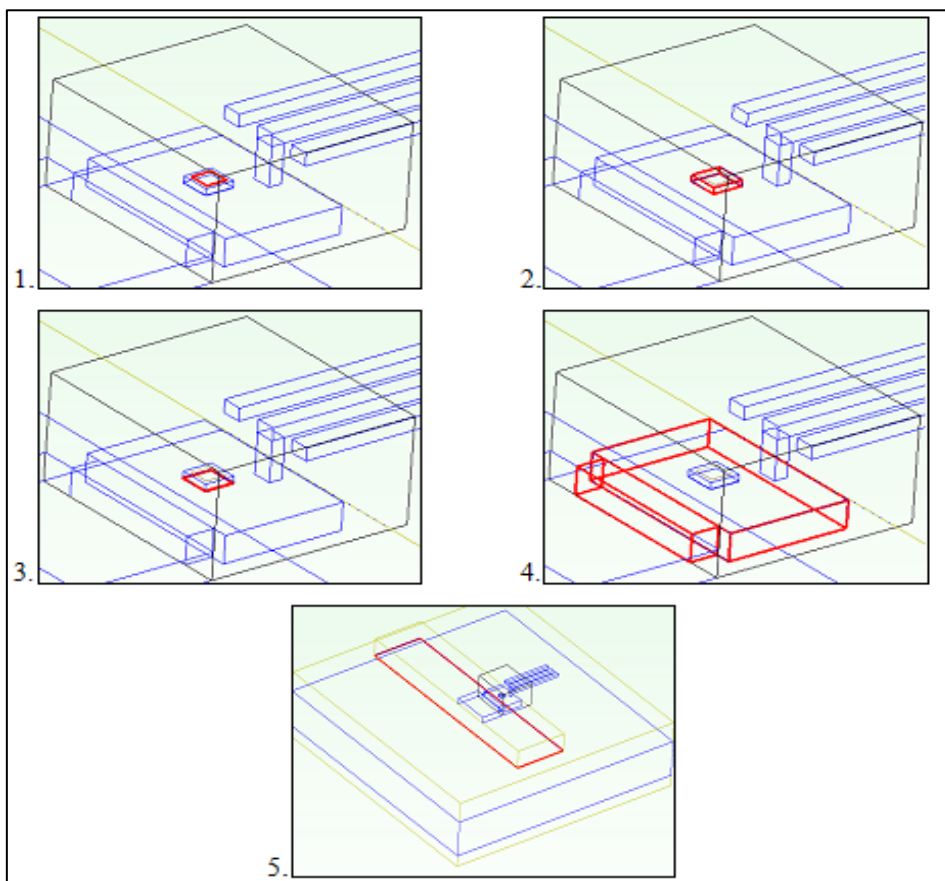
A munkám során a termikus tranziens görbe kezdeti szakaszának a pontos szimulálásával foglalkoztam. Feltételezhetjük, ha sikerül a mérési elrendezésünkhöz hű modellt alkotni, akkor a valósághoz közel álló eredményt kapunk a szimuláció során, ahol $t = 0$ időpillanattól kezdve látható a hőmérsékleti tranziens elektromos tranziens nélkül. Ha az így kapott görbét összeillesztjük a mért görbénkkal, akkor kapunk egy olyan kombinált válaszfüggvényt, ami ebből a két görbéből tevődik össze.

A következőkben először egy tranzisztoron mutatnám be ezt a szemléletet. A modell megalkotásához megmértem T3Ster-rel a vizsgált eszköz termikus tranziensét. Majd a tok felbontásával meghatároztam az eszköz geometriai paramétereit. Ezek után FloTHERM-ben felépítettem a geometriai modellt, mely a 4.16. ábrán látható.



4.16. ábra Tranzisztor modell FloTHERM-ben

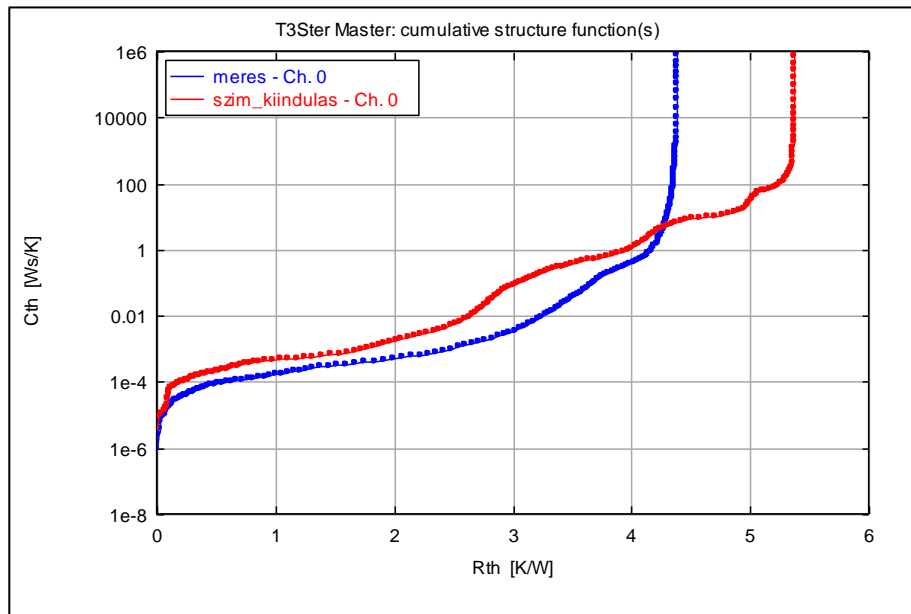
Jelmagyarázat az egyes rétegekhez:



4.17. ábra Tranzisztor egyes rétegei

1: die source 2: die 3: die attach 4: die flag 5: a hűtőlap és a tok közötti termikus interfész

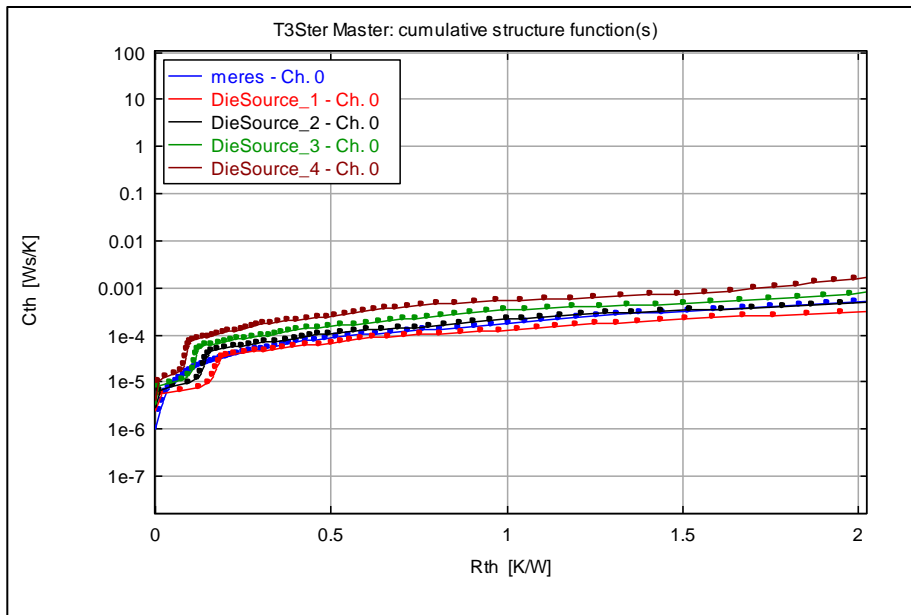
A geometriai felépítés után az egyes rétegekhez anyagokat rendeltem (pl. die - szilícium, die attach - kötőanyag Au-Si és így tovább), majd lefuttattam a szimulációt.



4.18. ábra Szimulált eredmény a kalibrálás előtt

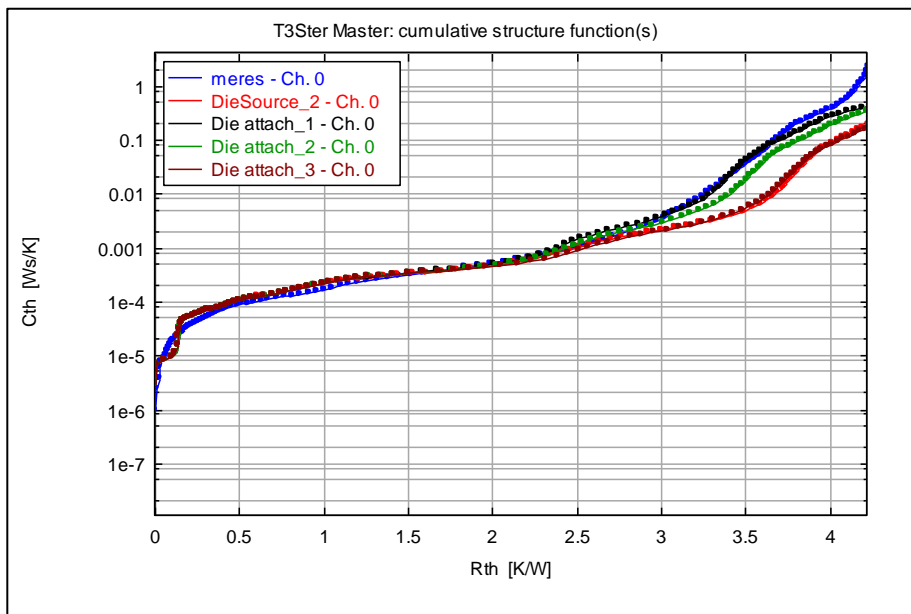
A kezdeti állapot a 4.18. ábrán látható. A modell a valóságtól még távol áll, mert a szimulált görbe nem illeszkedik a valós mért görbére. Ezért a modellen kalibrációt kell végrehajtani, ami azt jelenti, hogy az egyes rétegek anyagi jellemzőit és geometriai méreteit addig kell módosítani, amíg a szimulált görbe nem illeszkedik a mért görbére. A 4.1.2. alfejezetekben már bemutattam, hogy melyek azok az anyagi jellemzők, melyek dominálnak, így ezeket kell elsősorban változtatni. A struktúra függvényhez végzem a kalibrálást, mert ez az a függvény, mely jellemzi az eszköz struktúráját. A kalibrálás megkezdése előtt fontos meghatározni, hogy merről merre haladva végezzük a folyamatot. Vagy a külső rétegektől haladunk befelé a legbelső rétegek felé, vagy a belső rétegek felől haladunk a külső rétegek felé. Az a helyes megoldás, ha az utóbbit választjuk.

A legelső réteg melyen változtattam az a die source. Ennek a rétegnek nincs anyagi paramétere, mivel ez egy virtuális réteg a die-on belül, azonban a mérete módosítható. Ezzel modellezzük az aktív területét az eszköznek. A különböző méretváltoztatások hatásai a 4.19. ábrán láthatók. Számunkra most csak a struktúra függvény eleje a fontos, hisz a die source réteg a tokon belül helyezkedik el és a struktúra függvény kezdeti szakasza jellemzi a tokon belüli struktúrát. A legjobb illeszkedést a fekete görbe adja.



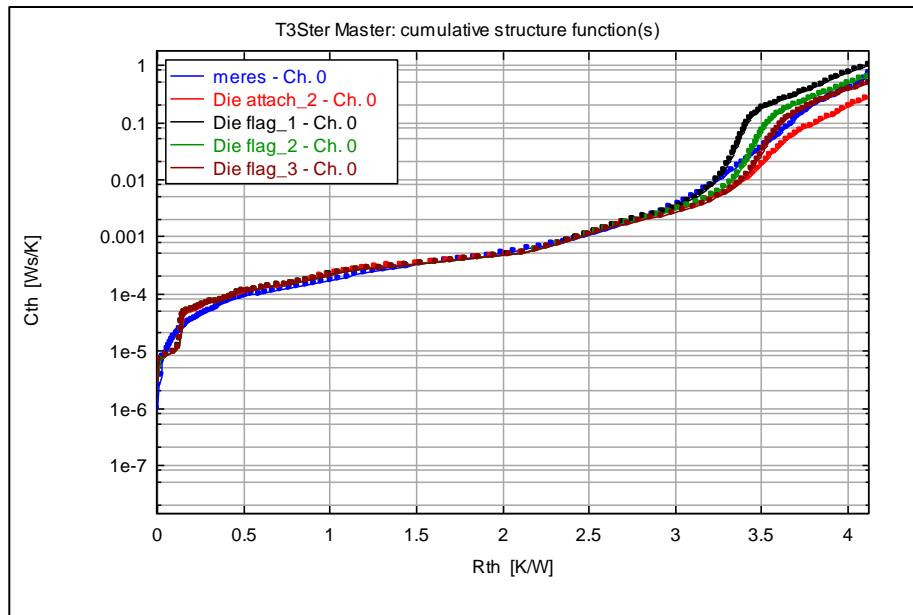
4.19. ábra Die Source kalibrálása

Miután bekalibráltuk a legfelsőbb réteget egyel feljebb léphetünk. Ebben az esetben ez a die attach réteget jelenti. Ezzel tovább javult a szimulált görbe illeszkedése a mért görbéhez (4.20. ábra). A legjobb illeszkedést a zöld görbénél lehet megfigyelni.



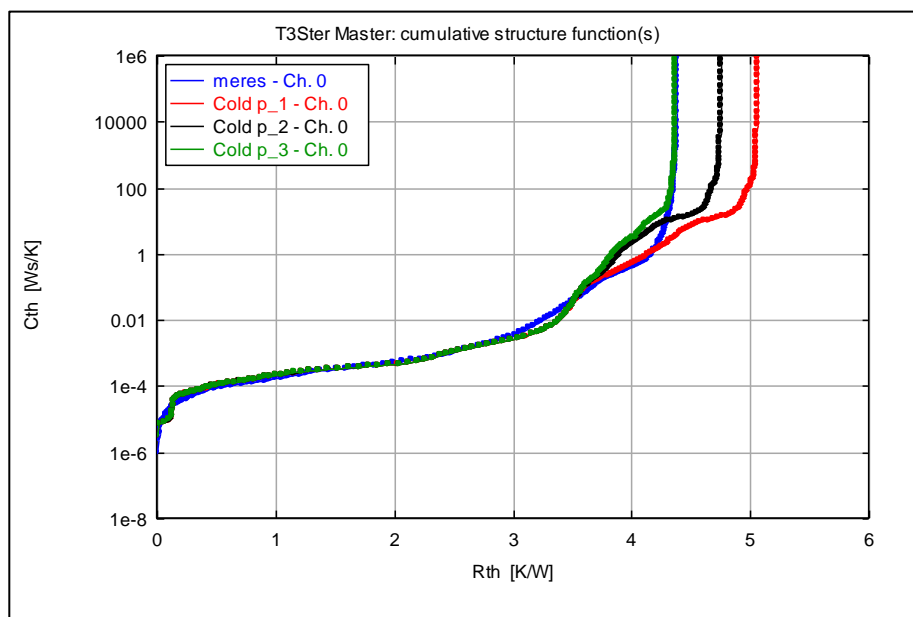
4.20. ábra Die attach kalibrálása

A soron következő réteg a die flag. Ennek a kalibrációs lépéseit a 4.21. ábrán lehet nyomon követni. Itt a fekete görbe beállításai a megfelelőek.



4.21. ábra Die flag kalibrálása

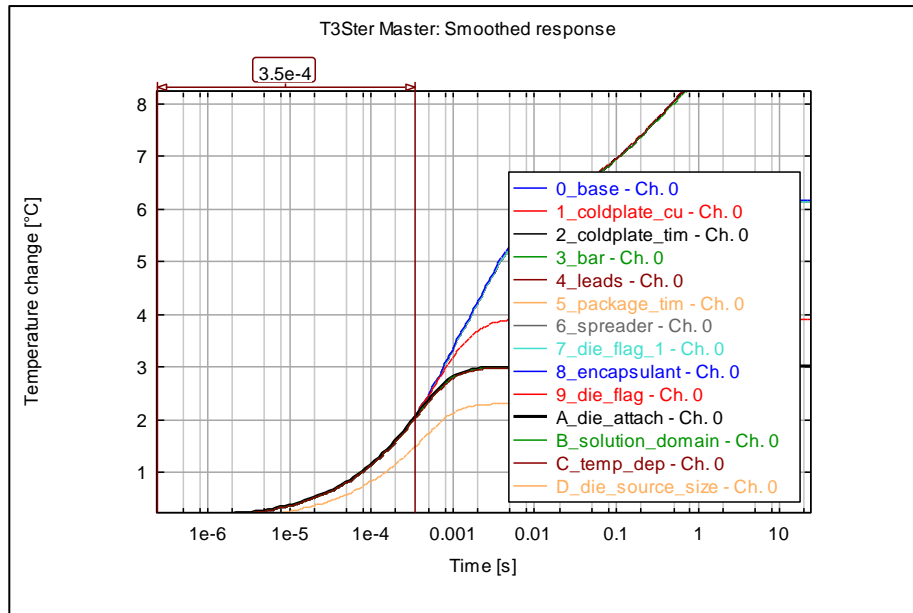
Végül a hűtőlap és a tok közötti termikus interfész (TIM) anyag paramétereit kell változtatni, ahhoz, hogy a struktúra függvények végső szakaszai is egyezzenek (4.22. ábra). Ebben az esetben a zöld görbe illeszkedik legjobban a mért görbénkhöz. Látható, hogy a szimulált görbe utolsó szakaszában nem tökéletes az egyezés, azonban ettől most eltekintünk, mivel ekkor már bőven a tokon kívüli környezetről beszélünk és minket most elsősorban a tokon belüli struktúra érdekel. Ez alapján kijelenthető, hogy egy jól közelített modellt tudunk felépíteni.



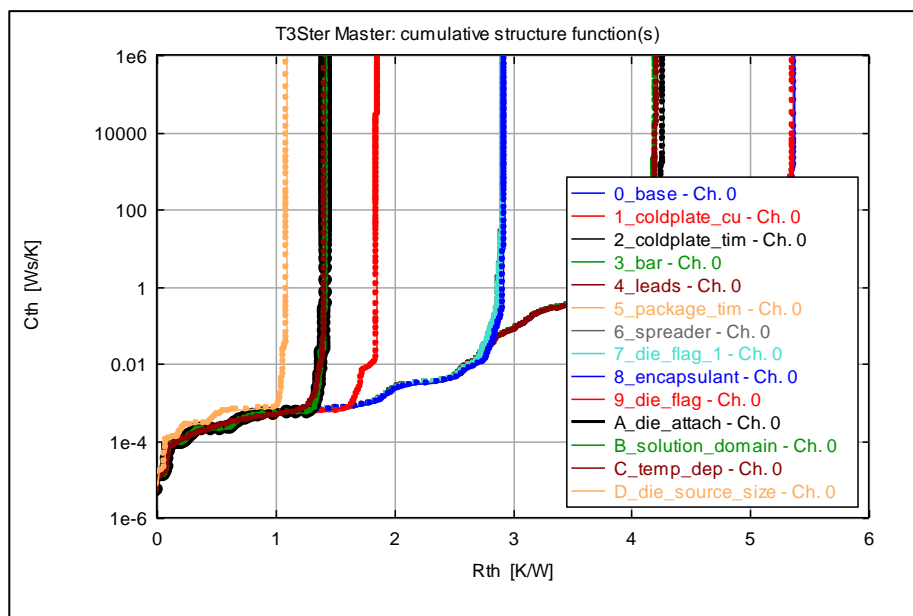
4.22. ábra Cold plate tim kalibrálása

4.4. Early Transient Simulator program alkalmazása

Először a 3. fejezetben taglaltakat szeretném kibővíteni. Állításunk szerint ahhoz, hogy a termikus tranziens görbe kezdeti szakaszát visszakaphassuk, elég az eszköz die és die source rétegét szimulálni. A 4.23. ábra, valamint a 4.24. ábra szemlélteti ezt a leírást.



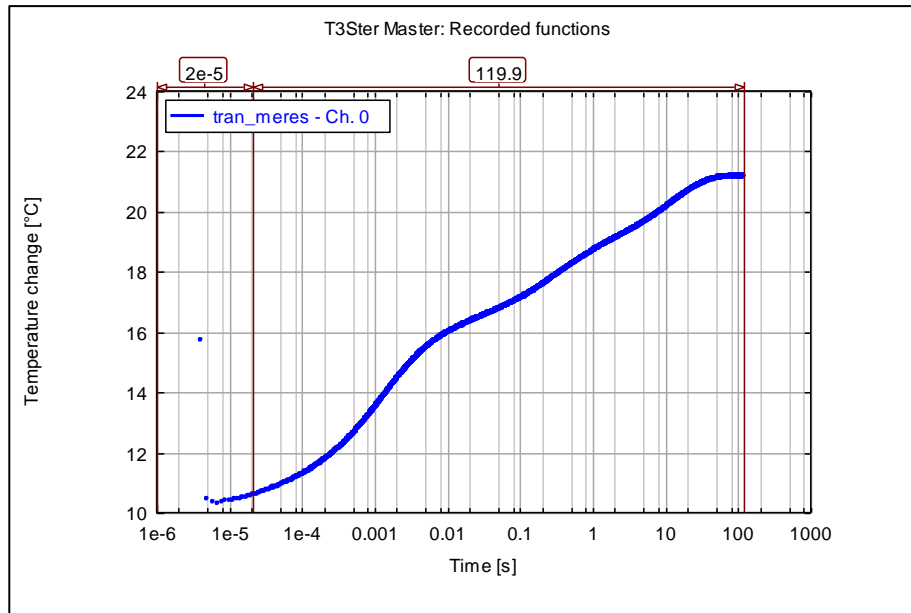
4.23. ábra Modell szétbontása I.



4.24. ábra Modell szétbontása I.

A két ábrán az látható, amikor a 4.3. alfejezetben felépített modellt elemenként lebontjuk. A külső rétegek folyamatos törlésével újra és újra szimuláltuk a modellt. Így kaptunk egy olyan képet az eszközről, mellyel megállapítható, hogy az egyes rétegek

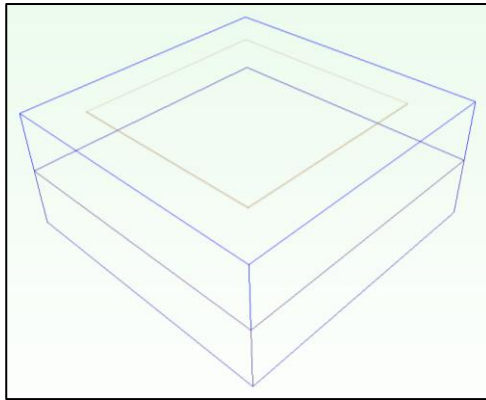
hogyan/mikortól befolyásolják a strukturális leírást. A 4.23. ábrán látható, hogy ebben az esetben a die attach réteg törlése után a görbe csak 350 μ s elteltével kezd eltérni az alap (kék) görbétől. Azaz a die attach réteg csak a 350 μ s utáni időszakot befolyásolja az eszköz struktúrájában. Másképp megközelítve, az 1D-os hőterjedési úton 350 μ s környékén éri el az első izoterma vonal a die attach réteget.



4.25. ábra Tranzisztor mért termikus tranziense

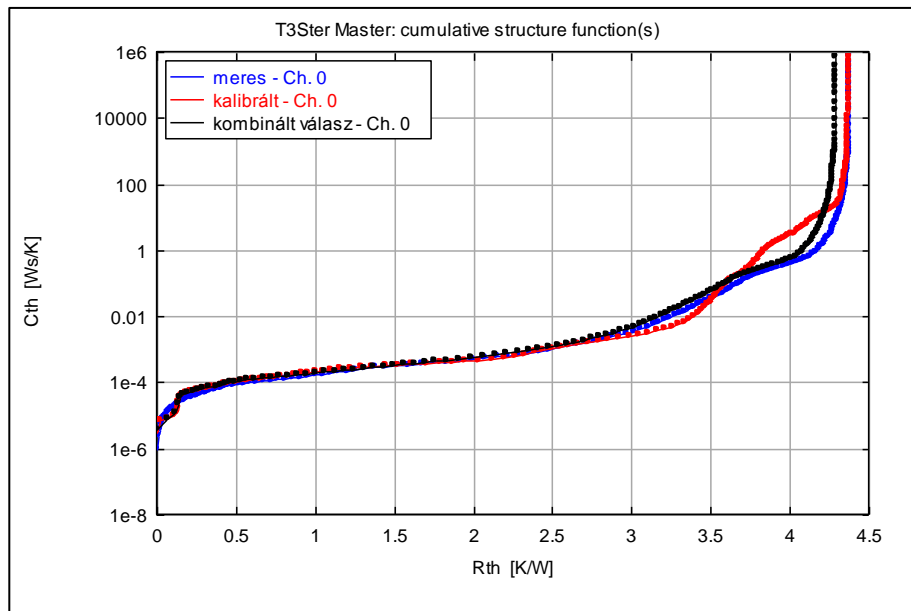
Azonban az elektromos tranziens körülbelül 20 μ s után eltűnik ennél a mérésnél (4.25. ábra). Így elmondható, hogy a 20 μ s és a 350 μ s közötti időintervallumban biztosan csak a die és die source réteg határozza meg az eszköz struktúra függvényét. Mivel mi az elektromos tranziens kiszűrésére helyezük a hangsúlyt, így kijelenthető, hogy számunkra elég csak a die és a die source réteget szimulálni, ahhoz hogy a termikus tranziens görbe kezdeti szakaszát visszakaphassuk.

Az Early Transient Simulator (továbbiakban ETS) futtatásához meg kell adni a die és a die source réteg fizikai paramétereit (szélesség, hosszúság, vastagság), valamint a T3Ster-rel mért termikus tranziens válaszfüggvényt. Az ETS a paraméterek felhasználásával a FloTHERM-ben felépíti az egyszerűsített modellt (4.26. ábra), majd az így kapott szimulált görbét és a mért görbét összeilleszti, és létrehozza a kombinált válaszfüggvényt.



4.26. ábra Egyszerűsített modell

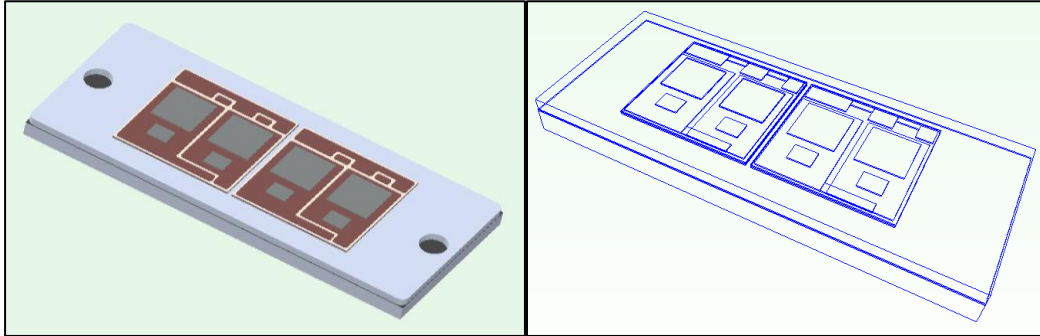
Célunk, hogy az előző fejezetben bekalibrált modell szimulált görbéjének kezdeti szakaszát, valamint a mért termikus tranziens görbe teljes szakaszát összevegyük az ETS által generált kombinált válaszfüggvénnyel. Ha a kapott eredmény illeszkedik mind a két görbéhez, akkor megállapíthatjuk, hogy az elgondolásunk helyes volt. A 4.27. ábrán látható, hogy a kalibrált görbe kezdeti szakasza és a kombinált válaszfüggvény kezdeti szakasza jól illeszkednek egymásra, valamint jól közelítik a valós mérési eredményét. Fontos megjegyezni, hogy az ETS program nem csak a modellt egyszerűsíti, hanem a szimulációs futási időt is nagymértékben lecsökkenti. Összegezve, ahhoz hogy megkapjuk a termikus tranziens hiányzó szakaszát, ahhoz elég a die és a die source réteget szimulálni, azonban szükséges a pontos fizikai paraméterek ismerete.



4.27. ábra Kombinált válaszfüggvény

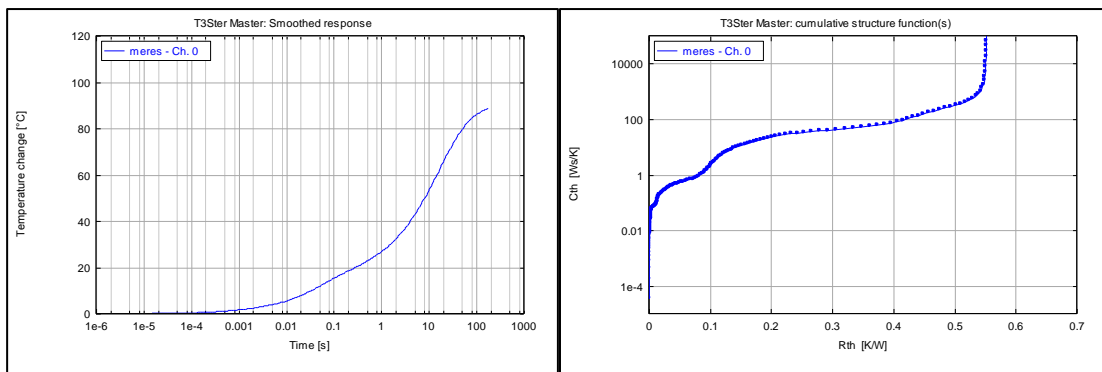
4.5. Az eljárás verifikálása komplex IGBT eszközön

A 4.3. és a 4.4. alfejezetben taglalt eljárást egy jóval összetettebb rendszeren is végrehajtottam. A vizsgált IGBT modul négy részegységből tevődik össze. Strukturális felépítése jóval komplexebb, mint az előző vizsgált eszköz struktúrája, mivel több rétegekből épülnek fel az egyes részegységek.



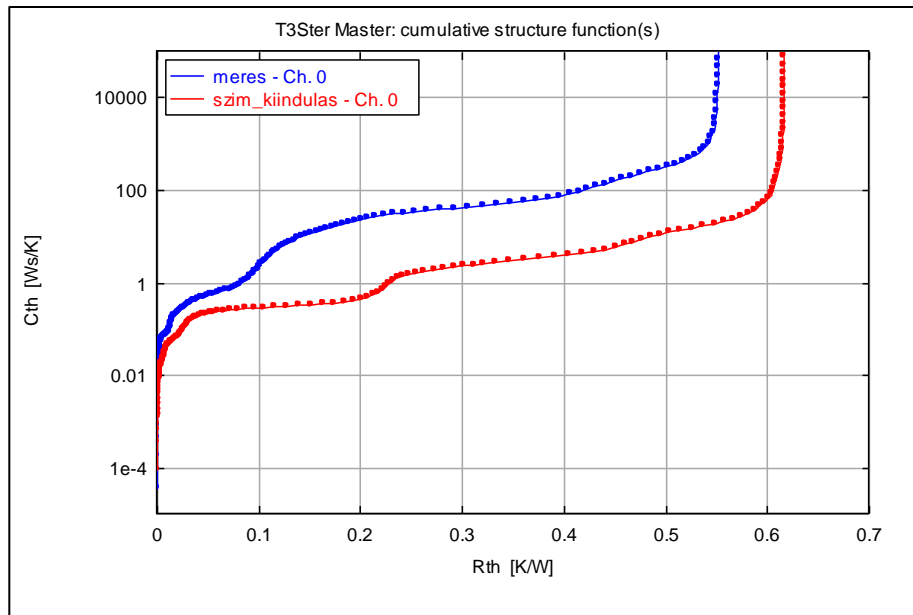
4.28. ábra IGBT modell FloTHERM-ben

A négy részegység közül a bal első modult vizsgáltam elsősorban. Ennek a modulnak a T3Ster-en mért termikus tranziens válaszfüggvénye a 4.29. ábrán látható. Először a rétegekhez anyagokat rendeltem (die - szilícium, die attach - forrasz anyag Au80/Sn20, és így tovább), majd az alapértelmezett anyagi jellemző beállítások mellett elvégeztem a szimulációt (4.30. ábra).



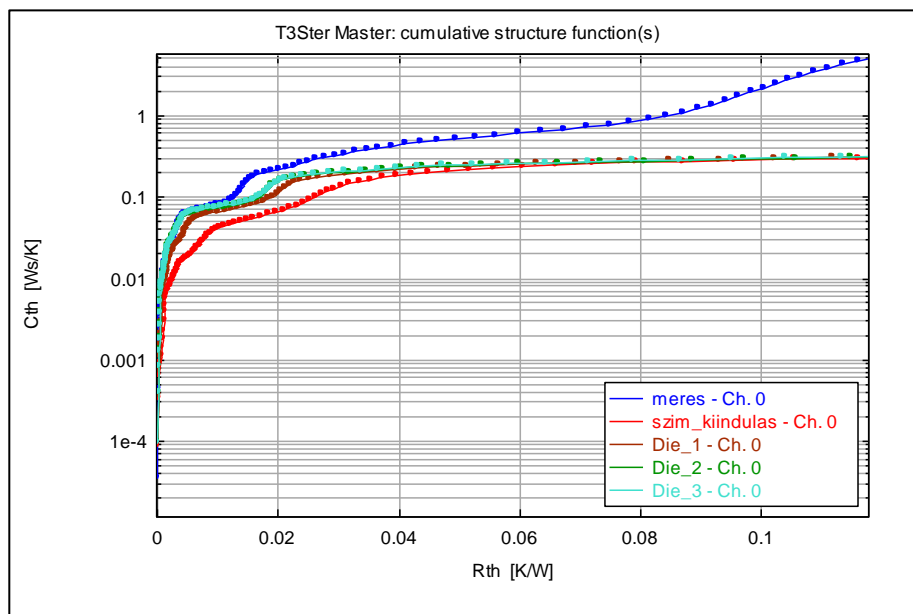
4.29. ábra IGBT mérési eredménye

Látható, hogy a mért görbétől még elég távol vagyunk, így itt is alkalmazni kell a kalibrációs folyamatot.



4.30. ábra Szimulációs görbe kalibrálás előtt

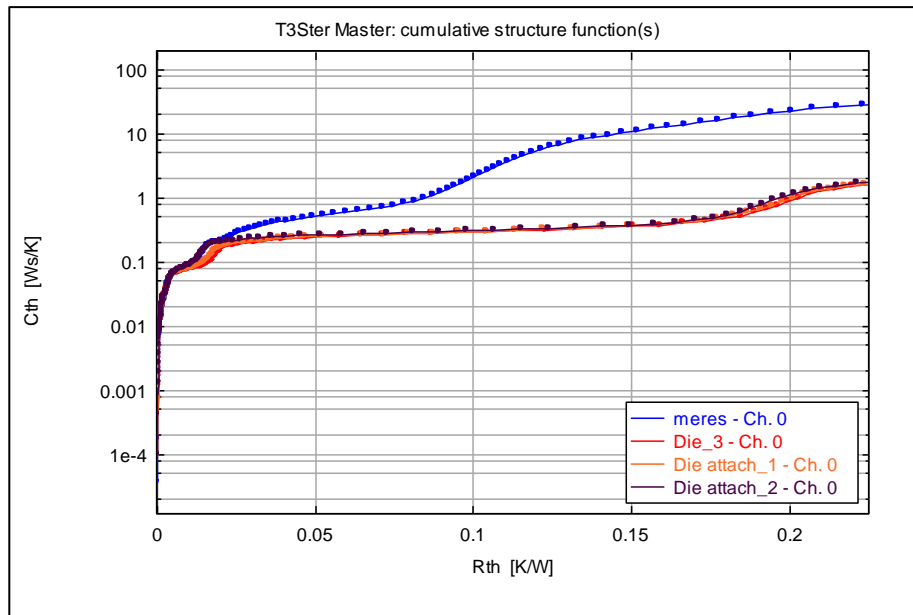
A legfelsőbb rétegtől kezdem a kalibrációt. Látható, hogy kisebb az első kapacitás lépcsője a szimulált görbének a mért görbéhez képest. Így a die source méretét kéne növelni ahhoz, hogy nagyobb legyen az első kapacitás lépcső, de már nem tudjuk tovább növelni a die source méretét. Így a die réteg anyagi paraméterét kell módosítanunk. A tokon belüli struktúra leírását a struktúra görbe kezdeti szakasza adja, így minket most csak a kezdeti szakasz jellege érdekel. A legjobb illeszkedést - az első kapacitás lépcsőig - a Die_3 görbe adta (4.31. ábra).



4.31. ábra Die réteg kalibrálása

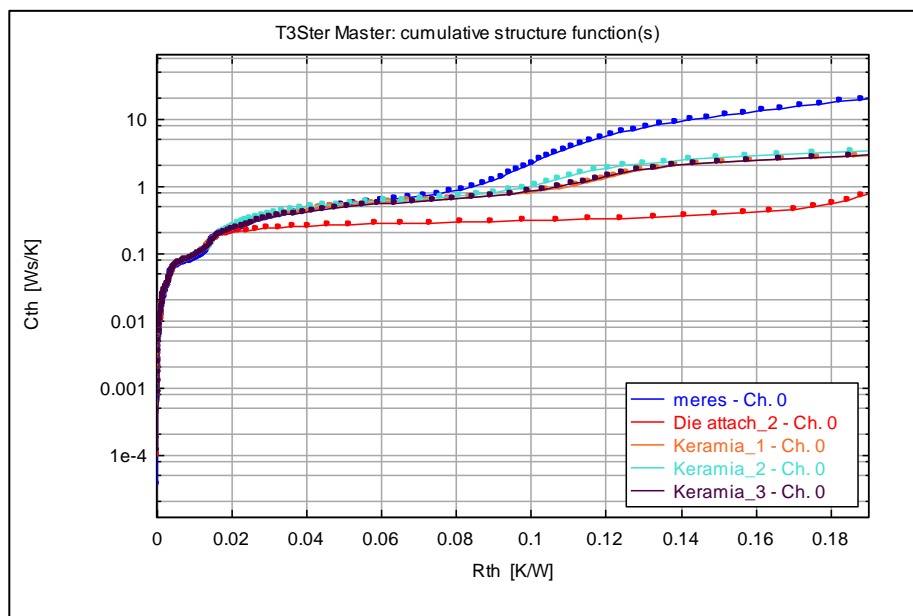
A die réteg kalibrálása után egy réteggel feljebb léphetünk, ami most jelen esetben a die attach réteget jelenti. Miután a die attach réteget is sikerült bekalibrálni (4.32. ábra), utána

a struktúra függvény hosszú egyenes szakaszát kellett megszüntetnünk. Ez a következő réteg nagy hőellenállása miatt alakult ki, így ezt kell majd jelentősen lecsökkenteni.



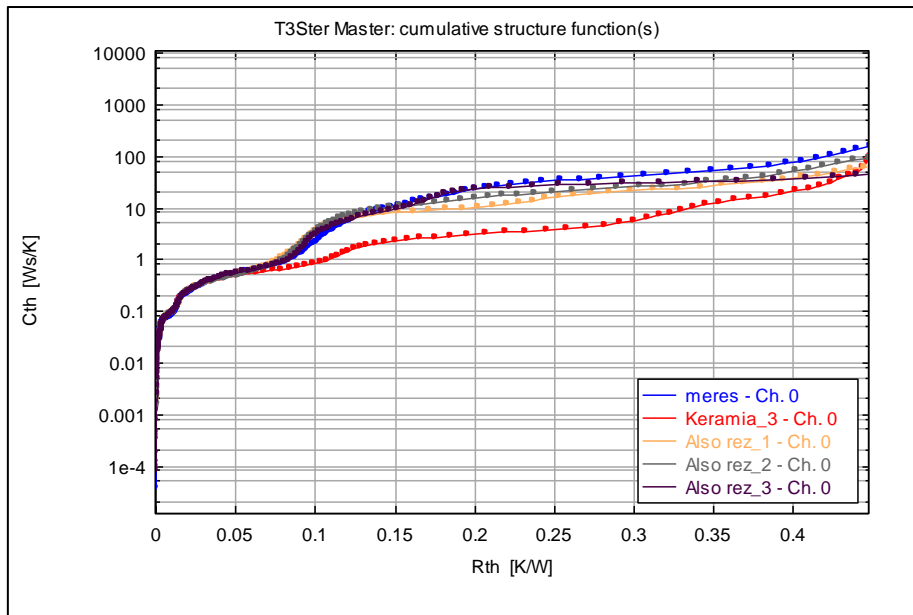
4.32. ábra Die attach réteg kalibrálása

A következő réteg a kerámia, így ennek a rétegnek kellett megnövelni a hővezetési együtthatóját. A 4.33. ábrán látható, hogy a hővezetési együttható növelésével lerövidült a hosszú egyenes szakasz.



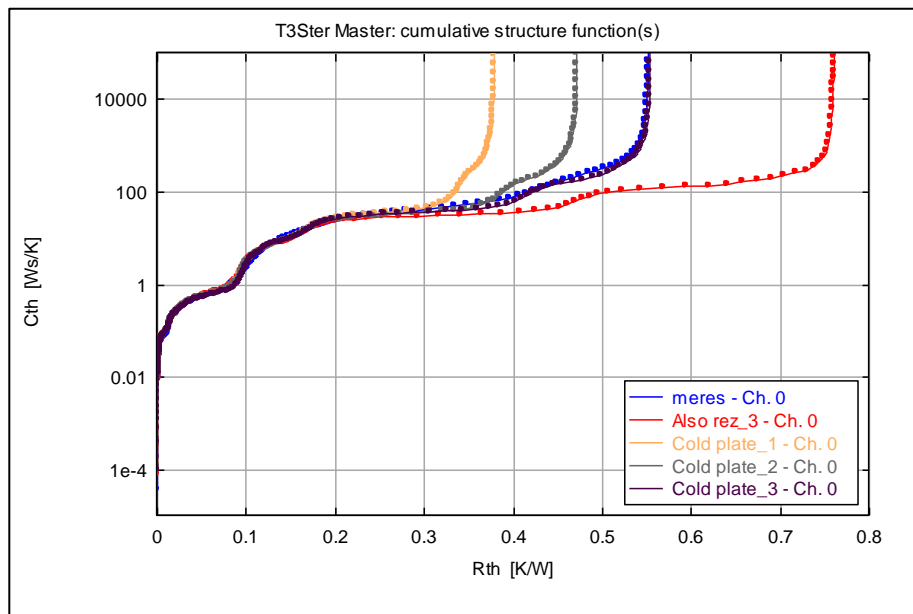
4.33. ábra Kerámia réteg kalibrálása

Majd az alsó réz réteg kalibrálása következett.



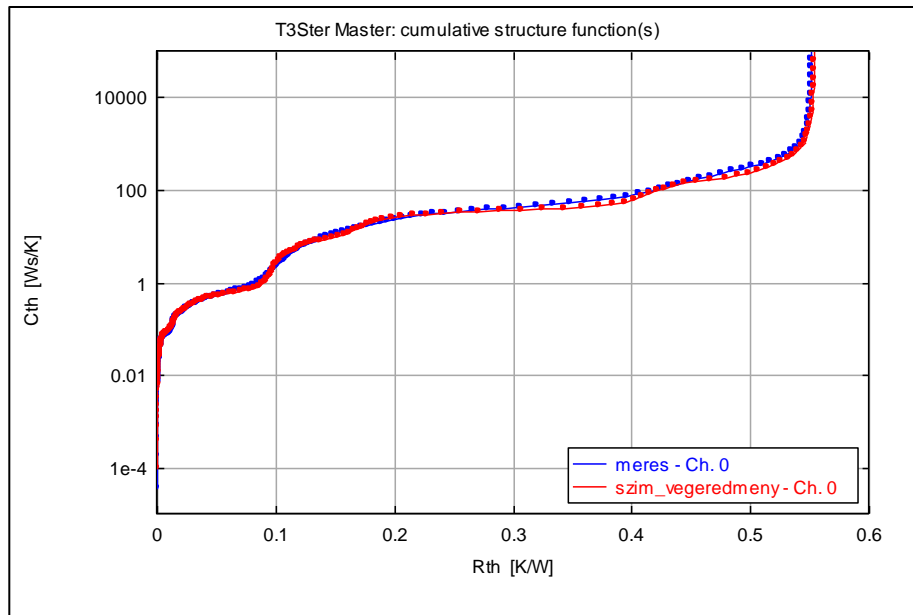
4.34. ábra Alsó réz réteg kalibrálása

A 4.34. ábrán látható, hogy tovább javult a szimulált eredményünk. Ezt az eljárást addig folytattam, míg el nem jutottam a külső rétegig. Ez a réteg a cold plate réteg. Ezzel a szimulált görbénk végső szakaszát lehetett hozzáilleszteni a mért görbéhez.



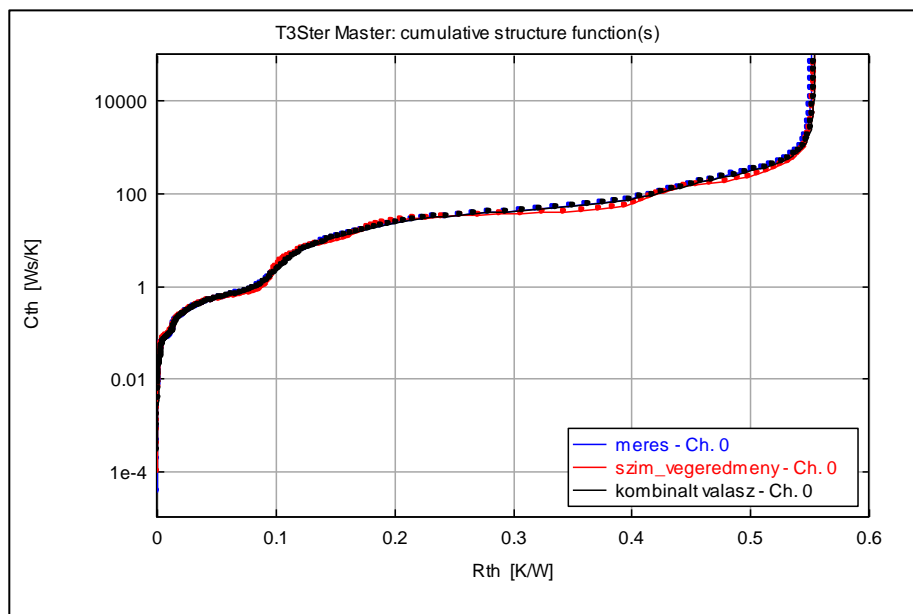
4.35. ábra Cold plate réteg kalibrálása

A végeredmény a 4.36. ábrán látható. A szimulált görbe a kezdeti szakaszától kezdve jól követi a mért görbénket. Ezzel kijelenthető, hogy sikerült a valósághoz közel álló modellt felépíteni.



4.36. ábra Cold plate réteg kalibrálása

A kalibráció után a kapott eredményt felhasználva az ETS program segítségével legeneráltuk a kombinált válaszfüggvényt, ugyanúgy, mint a 4.4. alfejezetben. A szimulált görbe és a kombinált válaszfüggvény kezdeti szakasza jól illeszkedik egymásra (4.37. ábra). Ez azt jelenti, hogy szintén elegendő csak a die és a die source réteget szimulálni ahhoz, hogy visszakapjuk az elektromos transziens által kitakart részt. Továbbá látható, hogy a két görbe jól követi a valós mért görbét.



4.37. ábra Kombinált válaszfüggvény

5. Eredmények értékelése, jövőbeni tervek

Célom az volt, hogy keressek egy olyan módszert, mely felhasználásával pontosan meg lehet határozni a hőmérsékleti tranziens görbe kezdeti szakaszát, melyet valójában nem láthatunk a mérés során az elektromos tranziens jelenléte miatt. Mindenez manuális beavatkozás nélkül lehessen megtenni. Ezt a problémát a hiányzó termikus tranziens szakasz szimulálásával, valamint ennek a mért görbéhez való kalibrálásával közelítettem meg.

Először egy egyszerűbb felépítésű struktúrán végeztem el ezt az eljárást. Miután biztató eredményeket kaptam, egy összetettebb struktúrán is végrehajtottam ugyanezt. Ennek az eredménye is igazolta az elképzelésemet.

Összegezve elmondható, ahhoz hogy visszakapjuk az elektromos tranziens által kitakart hőmérsékleti tranziens kezdeti szakaszát elegendő a die és a die source réteget szimulálni, azonban ezek pontos geometriai adataira szükségünk van.

Jövőbeli tervemnek tartom, hogy ezt az eljárást további eszközökön is kipróbáljam, majd a kapott eredményeket összegezzem. Ha lehetőségem lesz rá, akkor egy elektronikus eszközöket gyártó céggel felveszem a kapcsolatot, és a segítségükkel pontosítom a módszert. A céges kapcsolatra azért lenne szükség, hogy minél pontosabb chip és aktív terület geometriai adatokhoz juthassak, ezáltal a kritikus paraméterek pontatlanságából keletkező hibákat minimalizálni tudjam.

6. Irodalom jegyzék

- [1] Vladimir Székely, Tran Van Bien: Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: A measurement and identification method, Solid-State Electronics Volume: 31, Issue: 9, Pages: 1363-1368, 1988
- [2] Vladimir Székely: A new evaluation method of thermal transient measurement results, Mikroelectronics Journal Volume: 28 Pages: 277-292, 1997
- [3] Marta Rencz, Vladimir Székely, A. Poppe, G. Farlas, B. Courtois: New methods and supporting tools for the thermal transient testing of packages, APACK 2001 Conference on Advances in Packaging, Singapore
- [4] Bognár György: A mikroelektronika egyes termikus problémáinak kezelése, Doktori értekezés 2009 Budapest
- [5] Szabó Péter Gábor: Elektrotermikus mikrorendszerek modellezése és karakterizációja, Doktori értekezés 2011 Budapest
- [6] Szalai Albin: Termikus tranziens mérési adatkiértékelő szoftver továbbfejlesztése, Diplomaterv 2009 Budapest
- [7] Gábor Farkas, András Poppe: Chapter4: Thermal testing of LEDs
- [8] Electronic Industries Alliance: EIA/JEDEC STANDARD: Integrated Circuits Thermal Measurement Method - Electrical Test Method (Single Semiconductor Device), 1995 USA
- [9] <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-173510281975580/unrestricted/chapter4.pdf>
- [10] F.N.Masana: A new approach to the dynamic thermal modelling of semiconductor packages, Microelectronics Reliability Volume: 41 Issue: 6 Pages: 901-912, 2001
- [11] Glenn Swift, Tom S. Molinski, Waldemar Lehn: A Fundamental Approach to Transformer Thermal Modeling - Part I: Theory and Equivalent Circuit, Volume: 16 Issue: 2 Pages: 171-175, 2001
- [12] Michael T. Zhang, Milan M. Jovanovic, Fred C. Lee: Design and Analysis of Thermal Management for High-Power-Density Converters in Sealed Enclosures, Virginia Power Electronics Center, State University, Blacksburg, VA24061-0111, 1872

7. Ábrajegyzék

1.1 ábra Elektronikai hibák főbb okai	5
2.1. ábra Távvezeték elemi szakaszának elosztott paraméterű modellje	6
2.2. ábra R-C hálózat modellje	7
2.3. ábra Termikus hálózat helyettesítő modellje.....	8
2.4. ábra Villamos - Termikus analógia táblázat.....	8
2.5. ábra Cauer hálózat topológia	9
2.6. ábra Eszközvizsgálat	9
2.7. ábra RC kétpólus diszkrét időállandó spektrumképe	10
2.8. ábra Több tagból álló RC hálózat diszkrét időállandó spektrumképe.....	10
2.9. ábra Kumulatív struktúra függvény és Cauer topológiája.....	11
2.10. ábra Termikus tranziens mérés modellje.....	12
2.11. ábra Kalibrálási görbe	14
2.12. ábra I-V karakterisztika	14
2.13. ábra Termikus tranziens görbe	15
4.1. ábra Félvezető tokon belüli struktúrája	18
4.2. ábra Tranzisztor FloTHERM modellje	18
4.3. ábra Tranzisztoron túlnyúlt die attach I.....	19
4.4. ábra Tranzisztoron túlnyúlt die attach II.	19
4.5. ábra Tranzisztor die source vizsgálata I.	20
4.6. ábra Tranzisztor die source vizsgálata II.	20
4.7. ábra Tranzisztor die source vizsgálata III.	21
4.8. ábra Tranzisztor die source vizsgálata IV.	21
4.9. ábra Tranzisztor die source vizsgálata V.....	22
4.10. ábra Tranzisztor die source vizsgálata VI.	22
4.11. ábra Anyagi paraméter vizsgálat I.....	23
4.12. ábra Anyagi paraméter vizsgálat II.	24
4.13. ábra Minimum - gyökös illesztés	25
4.14. ábra Gyökös illesztés különböző vágások mellett I.	25
4.15. ábra Gyökös illesztés különböző vágások mellett II.	26
4.16. ábra Tranzisztor modell FloTHERM-ben	27
4.17. ábra Tranzisztor egyes rétegei.....	27
4.18. ábra Szimulált eredmény a kalibrálás előtt	28
4.19. ábra Die Source kalibrálása.....	29
4.20. ábra Die attach kalibrálása	29
4.21. ábra Die flag kalibrálása.....	30
4.22. ábra Cold plate tim kalibrálása.....	30
4.23. ábra Modell szétbontása I.....	31

4.24. ábra Modell szétbontása I.....	31
4.25. ábra Tranzisztor mért termikus tranziense	32
4.26. ábra Egyszerűsített modell	33
4.27. ábra Kombinált válaszfüggvény.....	33
4.28. ábra IGBT modell FloTHERM-ben	34
4.29. ábra IGBT mérési eredménye.....	34
4.30. ábra Szimulációs görbe kalibrálás előtt.....	35
4.31. ábra Die réteg kalibrálása	35
4.32. ábra Die attach réteg kalibrálása	36
4.33. ábra Kerámia réteg kalibrálása	36
4.34. ábra Alsó réz réteg kalibrálása	37
4.35. ábra Cold plate réteg kalibrálása	37
4.36. ábra Cold plate réteg kalibrálása	38
4.37. ábra Kombinált válaszfüggvény.....	38