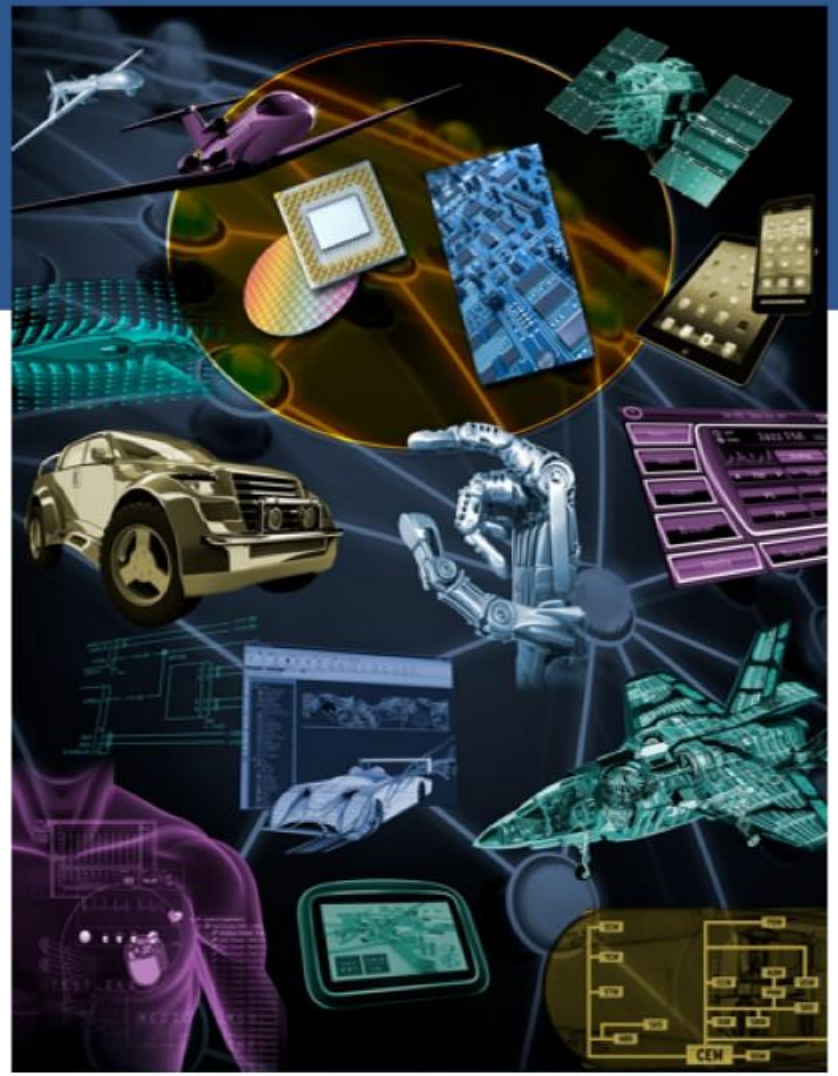


Termikus tesztelés a megbízhatóbb elektromos hajtásokért

Sárkány Zoltán, Rencz Márta az MTA doktora

Mentor, a Siemens Business,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Villamosmérnöki kar, Elektronikus Eszközök tanszék

2019 Május 8.

MŰEGYETEM 1782

Mentor®
A Siemens Business

Áttekintés

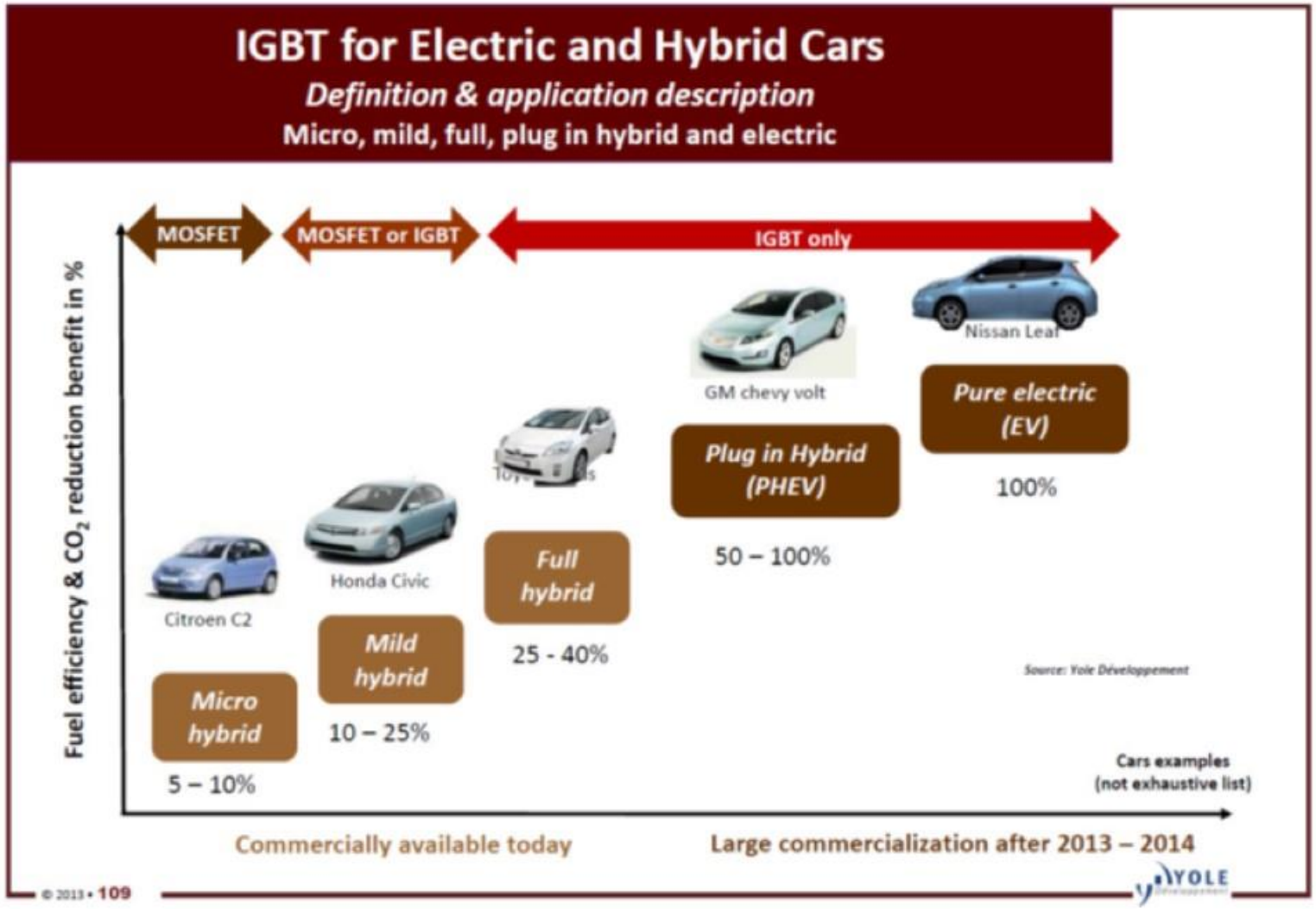
- Kutatás célkitűzése:
  Ipari megoldás kialakítása félvezető modulok teljesítmény ciklusokkal szemben mutatott megbízhatóságának vizsgálatára, hibaokok szétválasztására

- Témák:
  - Motiváció
  - Meghibásodási módok szétválasztása
    - Bekötő vezetékek hibája
    - Strukturális változások kimutatása és elkülönítése
  - Mért élettartamot befolyásoló tényezők
    - Elektromos bekötések hatásai

© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

MOTIVÁCIÓ

Miért?



© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

Miért?

IGBT for Electric and Hybrid Cars

EV/HEV charging stations

Battery Chargers - Segmentation

- Typical charger levels for EV/HEV:

Components potentially used	Charge mode	Charger type	Average Power level	Typical Power input	
IGBT discrete *MOSFET* *SJ MOSFET*	*Level 1*	Emergency charging Car embedded charger	*1.5kW*	AC120V, 15A single phase	
IGBT discrete *SiC discrete* *SJ MOSFET*	*Level 2*	Home charging wall mounted	*6.6kW*	AC230V, 40A single phase	
IGBT module *SiC module*	*Level 3*	Charging station or Fast charging	*25 ~ 160kW*	AC208 ~ 600V three-phase	

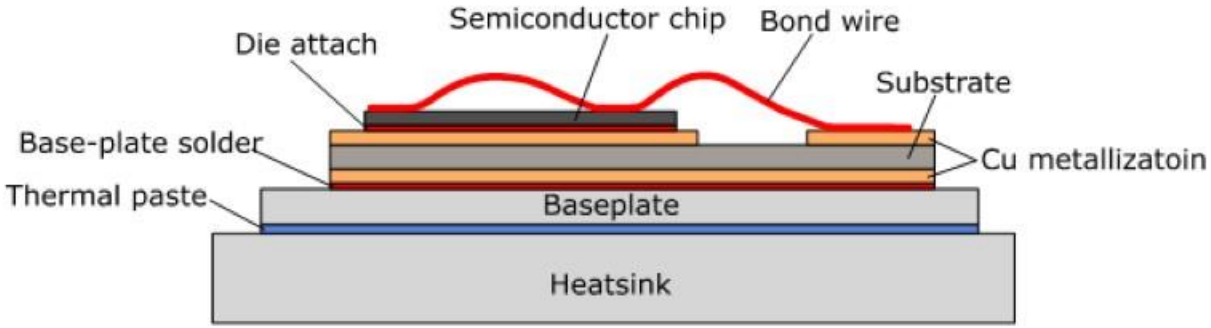
© 2013 • 121

YOLE

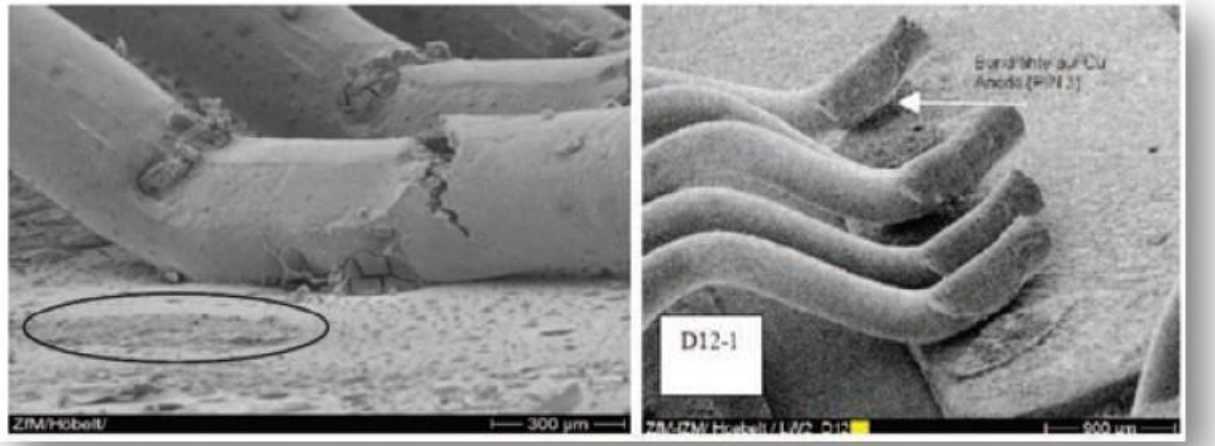
© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

Fókuszban a teljesítménymodulok megbízhatósága

- Példák:
  - Hibrid és elektromos járművek (EV)
  - Vasúti vontatás
  - Megújuló energia termelés



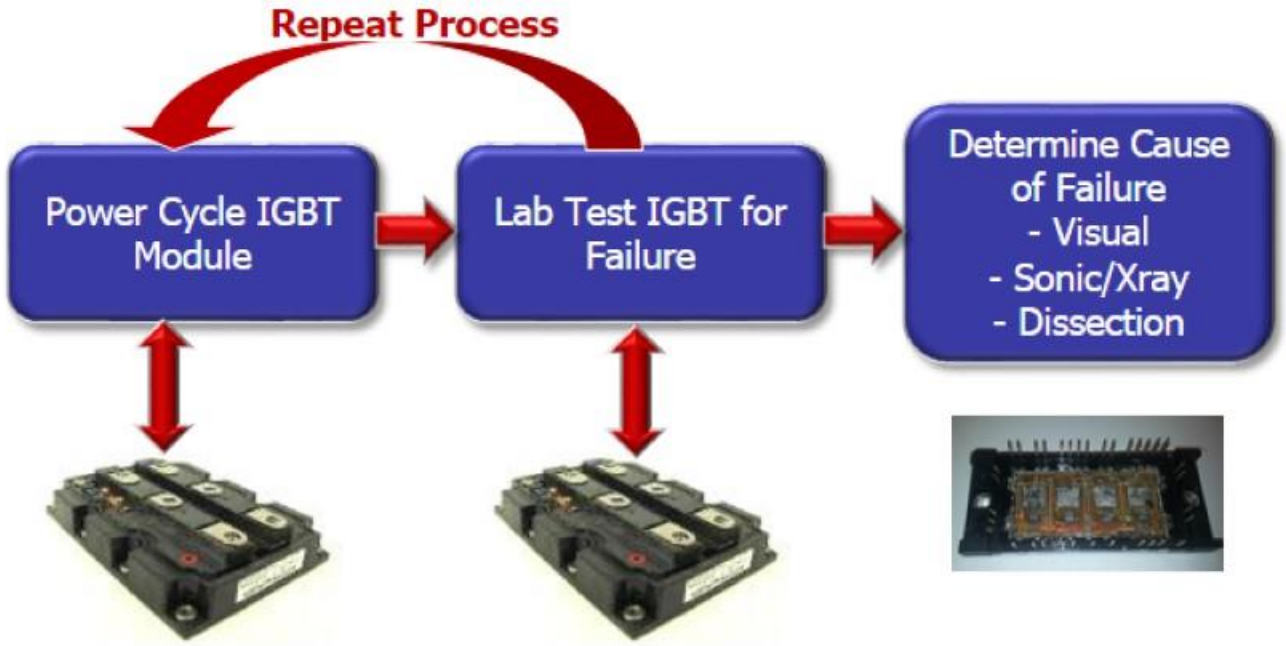
- Több 10 millió használati ciklus szükséges
- Probléma forrása a periodikus hőmérsékelt változás hatására fellépő thermo-mechanikus feszültségek
  - Bekötő vezetékek törése/leválása
  - Fémezési rétegek elválása
  - Alaplemez forrasztás kifáradása
  - Chip és hordozó törése



© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

Hagyományos teljesítmény ciklálás

- Tesztelési eljárás:
  - Meghatározott számú terhelési ciklus alkalmazása
  - Modul kiszerelése, és labor tesztek elvégzése
  - Terhelési és tesztelési ciklusok ismétlése, meghibásodásig
  - Labor tesztek végzése a meghibásodás okának meghatározására
- Problémák:
  - A terhelő és teszt készülékek közötti mozgatás jelentősen megnöveli a teszt idejét
  - Nincs valós idejű információ a hibaindikátorok alakulásáról
  - A meghibásodás okának meghatározására a már meghibásodott eszköz alapján kell következtetni



Lehetséges megoldás: teljesítmény ciklálás és diagnosztikai mérés integrálása egy rendszerbe.

© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

Termikus tranziens mérés, Struktúra függvény

MŰEGYETEM 1782

Hőmérséklet

- A hőmérsékletmérés visszavezethető feszültségjel mérésére (pl. p-n átmenet nyitófeszültsége)

Követhetővé teszi a hő terjedésének folyamatát az tokozásban:

- Fűtőteljesítményt változást kapcsolunk a félvezető eszközre,
- és mérjük a hőmérséklet változás időfüggvényét

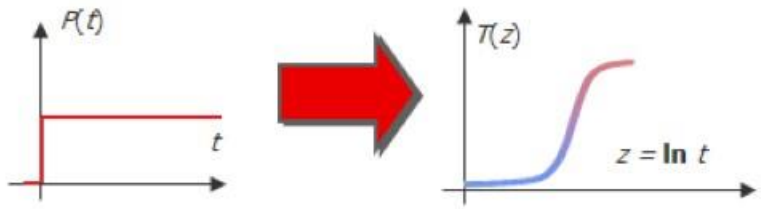
Struktúra

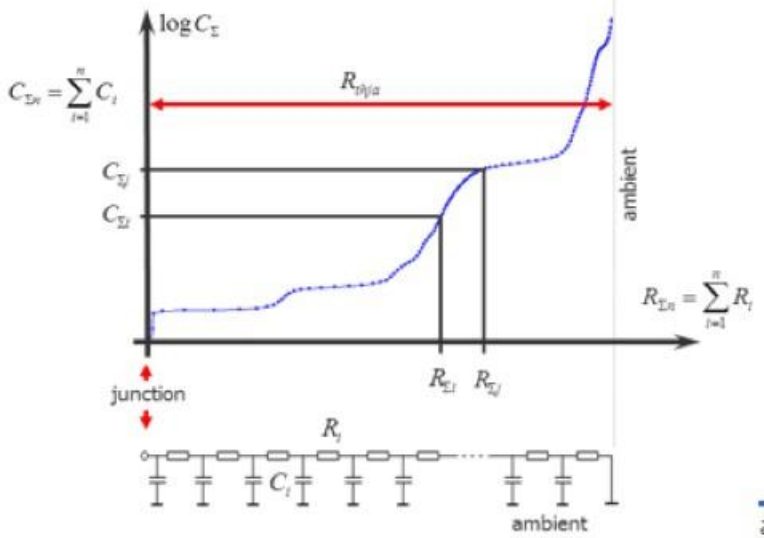
- RC hálózati modell
- A rendszer megértése

excitation ⊗ system = response

electric power ⊗ device = temperature

device = temperature $\otimes^{-1}$ electric power



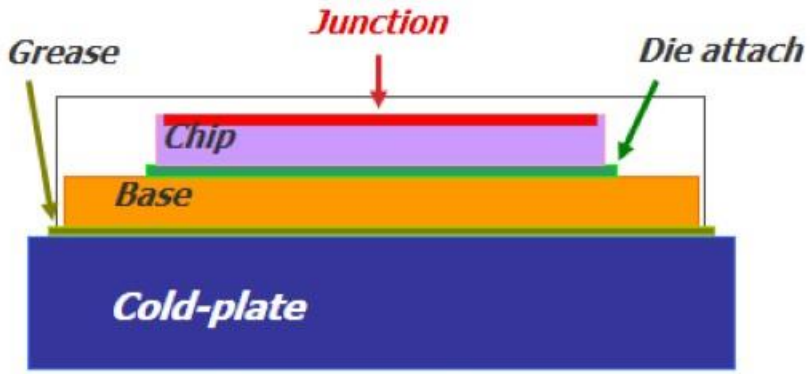


any Confidential

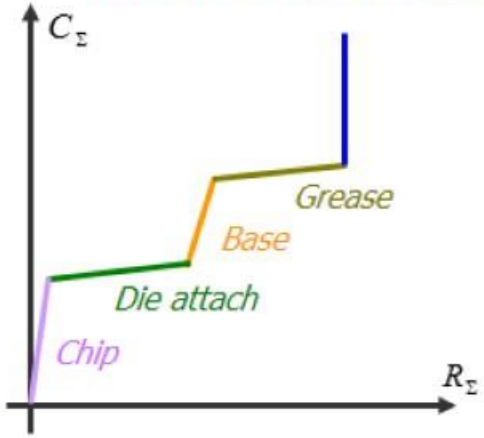
Mentor A Siemens Business

Struktúra függvény: Kulcs a termikus struktúra megértéséhez

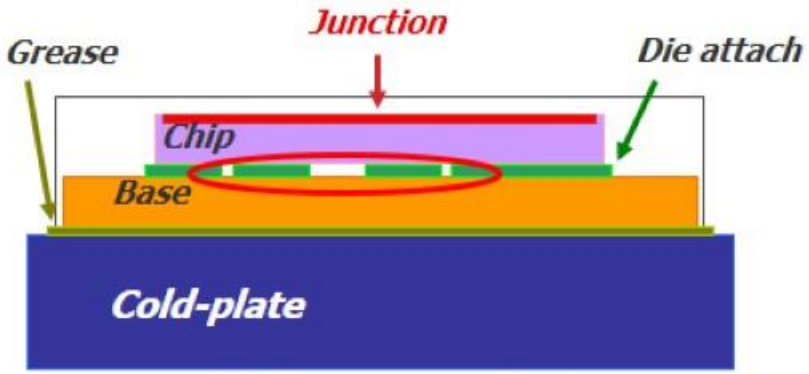
Ismert referencia eszköz



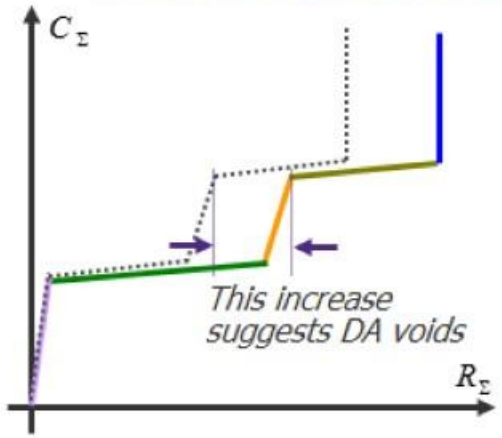
Identify its structure function:



Ismeretlen eszköz feltételezett strukturális hibával



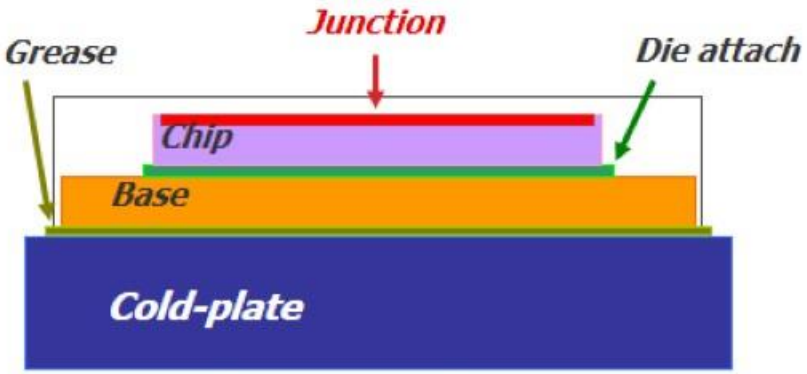
Identify its structure function:



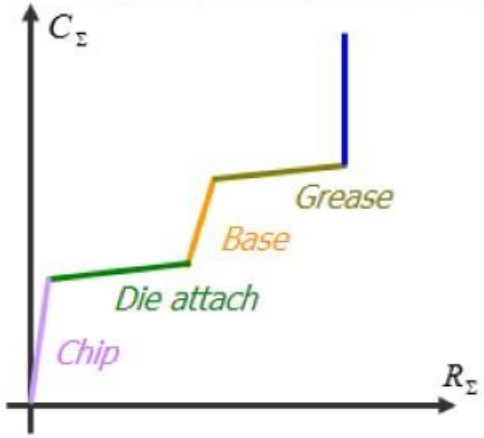
© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

Struktúra függvény: Kulcs a termikus struktúra megértéséhez

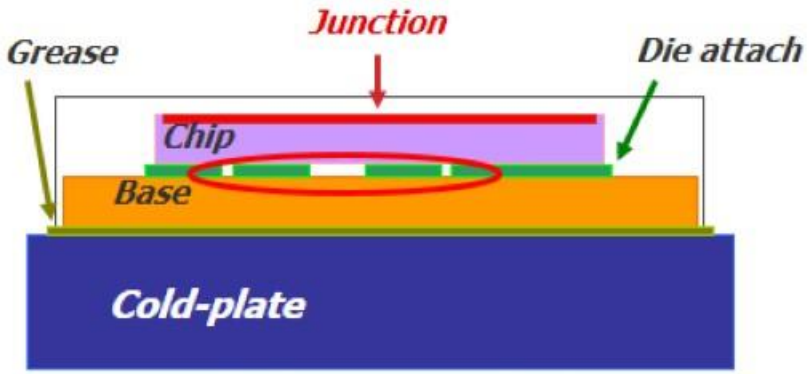
~~Ismert referencia eszköz~~
Eszköz állapota a teszt megkezdésekor



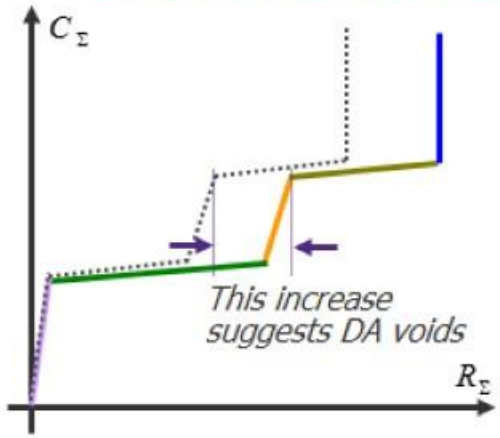
Identify its structure function:



~~Ismeretlen eszköz feltételezett strukturális hibával~~
Eszköz állapota az ellenőrző mérésekkor



Identify its structure function:

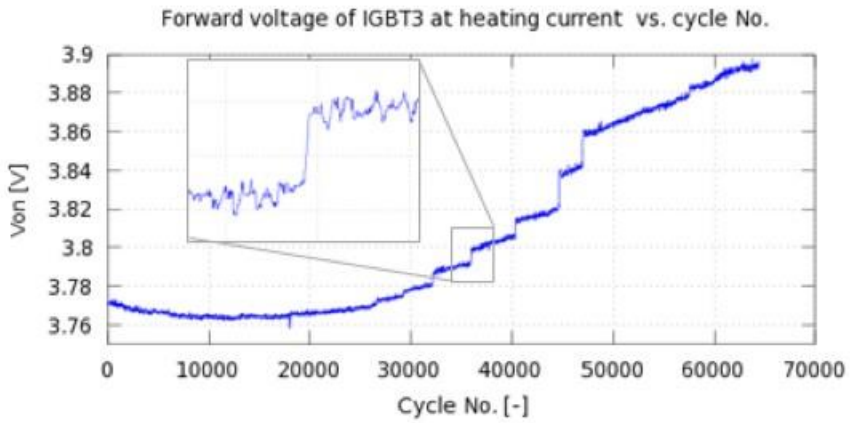


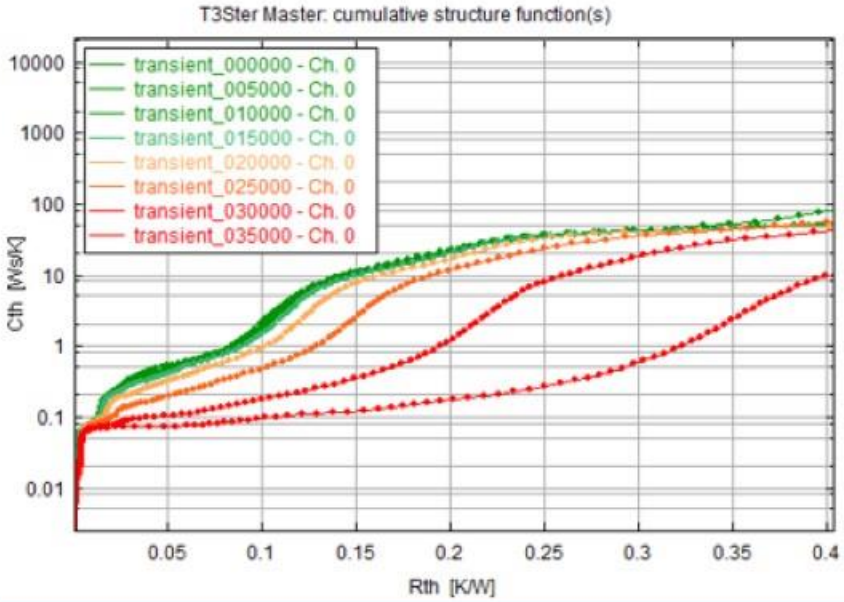
© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

Fontos elektromos és termikus paraméterek folyamatos megfigyelése

Feszültségesés (mind fűtés és hűlés alatt) (Vhot@Isense, Vcold@Isense, Vhot@Iheating)

- Chip hőmérséklet ($T_{j,min}$, $T_{j,max}$, ΔT_j)
- Fűtőteljesítmény (P)
- Fűtőáram (I_C)
- Gate áram (I_G)
- Normált chip hőmérséklet ($\Delta T_j/P$)
- Termikus tranziens mérés rendszeres időközönként (Zth, STF)



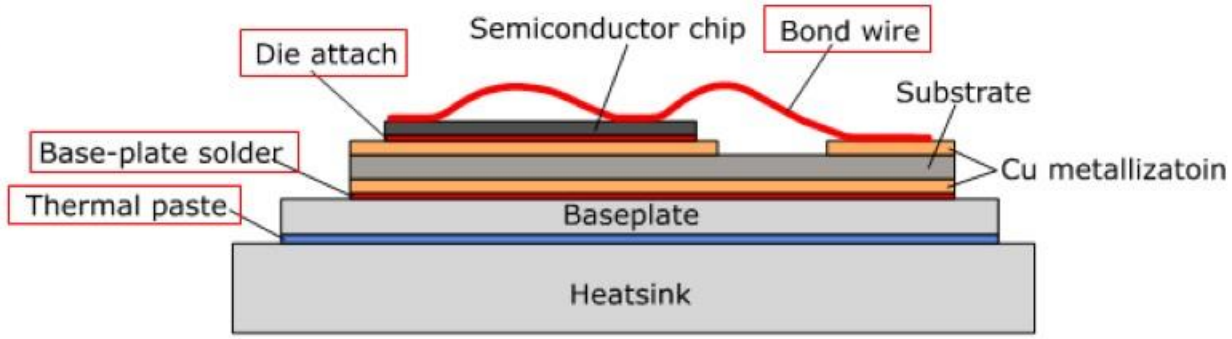


© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

MEGHIBÁSODÁSI MÓDOK SZÉTVÁLASZTÁSA

Meghibásodási módok szétválasztása

- Átlagos teljesítménymodulok leggyakrabban meghibásodó elemei:
  - Bond vezetékek
  - Chiprögzítő réteg
  - Alaplemez forrasztás

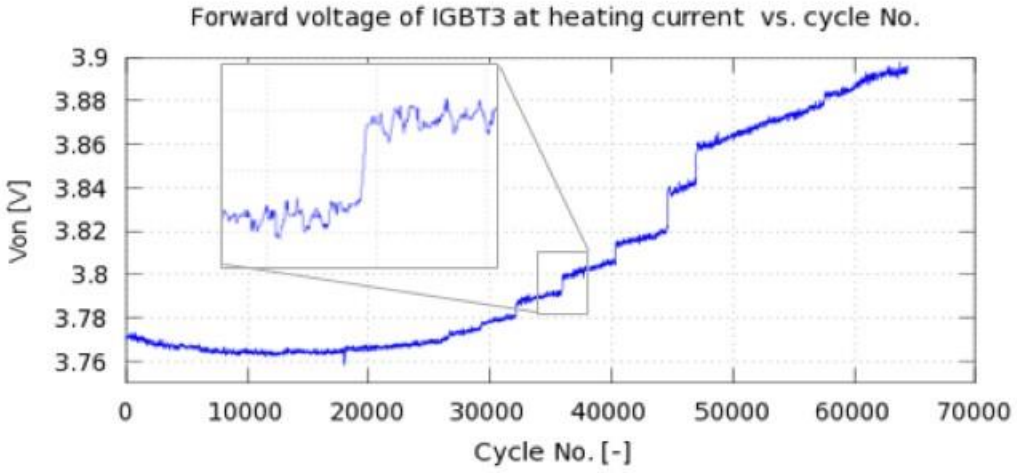


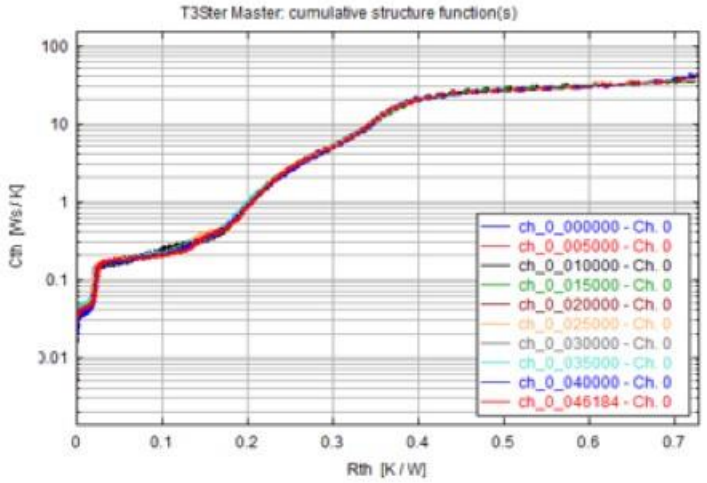
- A terhelés egyszerre fejti ki hatását a struktúra minden elemére, így a különböző meghibásodási mechanizmusok egymással párhuzamosan jelenhetnek meg
- Fontos a különböző hibaokok hatásainak szétválasztása

© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

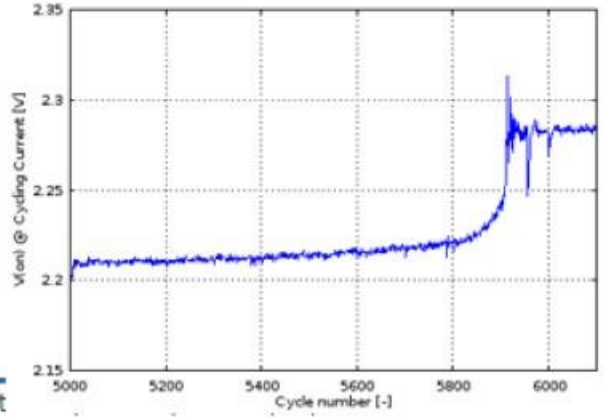
Bond vezetékek meghibásodása I.

- Meredek szakaszok a nyitó feszültség értékének alakulásában: bond vezeték leválása/törése
- A tokozás hőellenállásának változatlansága (ΔRth < 0.5%) jelzi, hogy nem a fő hőút változott





- Bond wire romlásának jellemző alakulása
  - Fokozatosan növekedő feszültségesés -> repedések fokozatos terjedése (párhuzamos bond vezetékek együttes hatása)
  - Ugrásszerű változás -> egy bond vezeték leválása

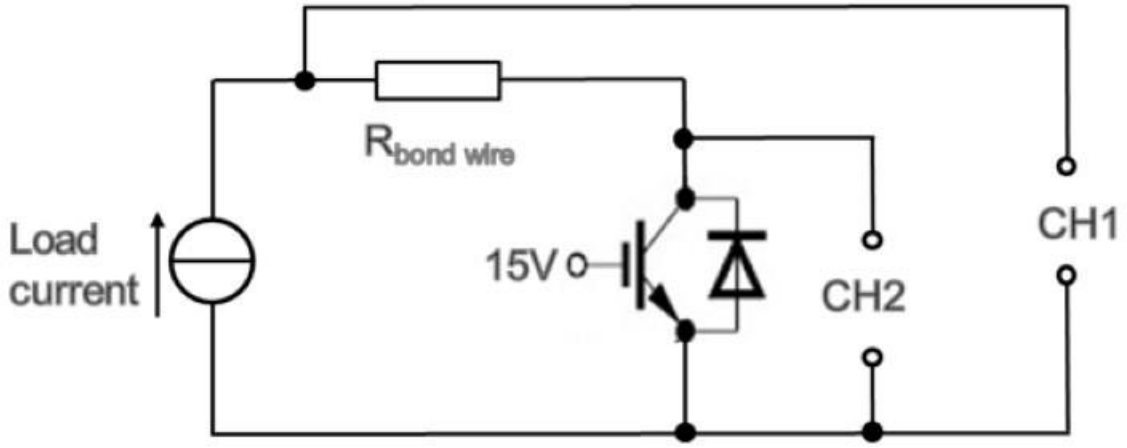


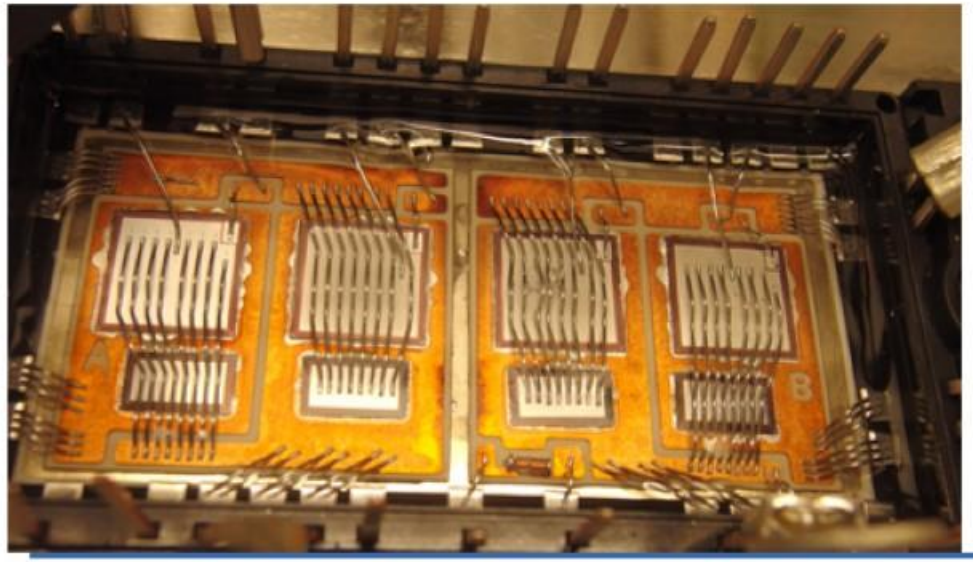
© Ment

Bond vezetékek meghibásodása II. Kísérleti összeállítás

- IGBT mérése nyitott állapotban, V_{GS}=15V
- Mérsékelt mértékű terhelő áram, hogy ne okozzon tényleges termikus romlást a teszt ideje alatt
  - $I_{D\ max}$=80A
- Mértük az eszközön eső feszültséget a nagy- és kisáramú kollektor kontaktusokon
- R_{th} mérést futtattunk minden 1000 teljesítmény ciklus után
- 1000 ciklusonként egy bond vezetéket elszakítottunk (1500 ciklus után kezdve)

I_{load}	50 A
ΔP	~65 W
ΔT	~35 °C
$T_{Heating}$	0.5 s
$T_{Cooling}$	1 s





© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

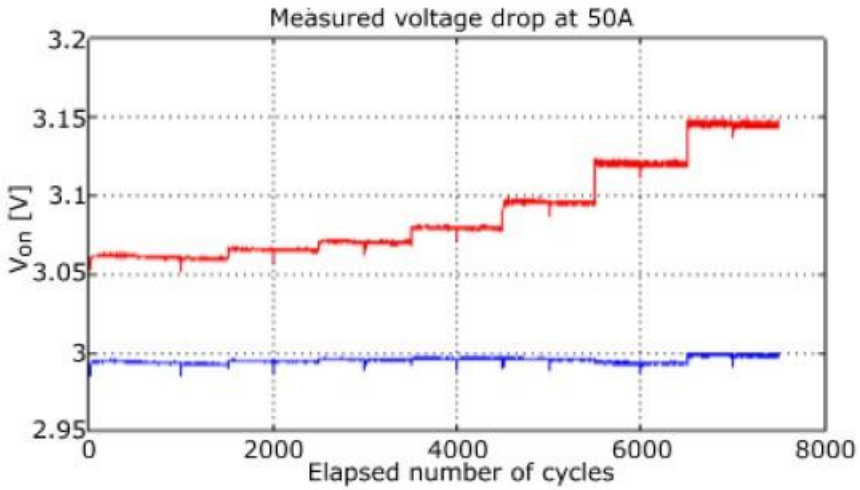
Bond vezetékek meghibásodása III. Kísérlet eredménye

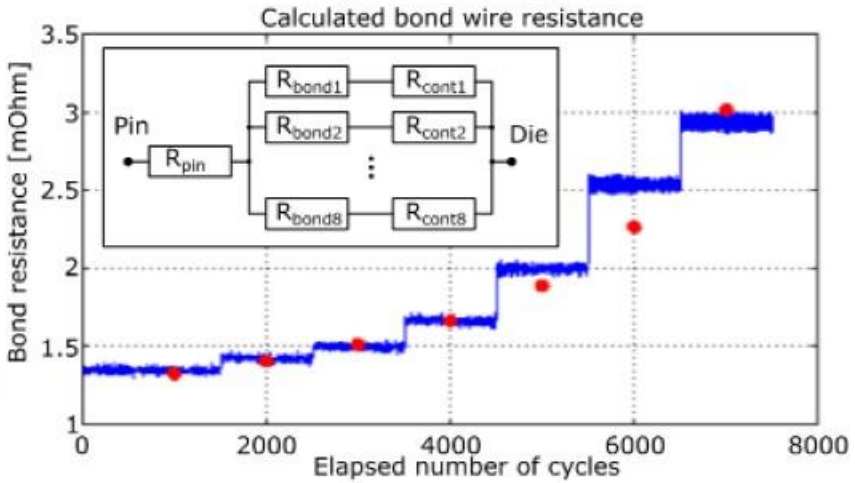
- A nagyáramú kontaktusokon mért feszültség hasonló jelleget mutat a korábban látottakkal
  - A soros ellenállás változása kiszámítható, a változás egyszerű ellenállás háló modellel jól közelíthető
  - A modell és mért értékek eltérése magyarázható a chip felületén megváltozott áram eloszlás hatásával

- Általános esetben a lapka hőmérsékletének változása is hatással lehet a $V_{CE,ON}$ feszültségre
  - A kis mérőáram mellett mért hőmérséklet alapján ez a hatás kompenzálható (R_s kicsi)

$$\Delta R_S = \frac{U_{CE}(I_h) - U_{CE0}(I_h) - k_h \Delta T_j}{I_h}$$

  - A k_h (hőmérséklet érzékenység fűtő áram mellett) kalibrációja azonban kihívás

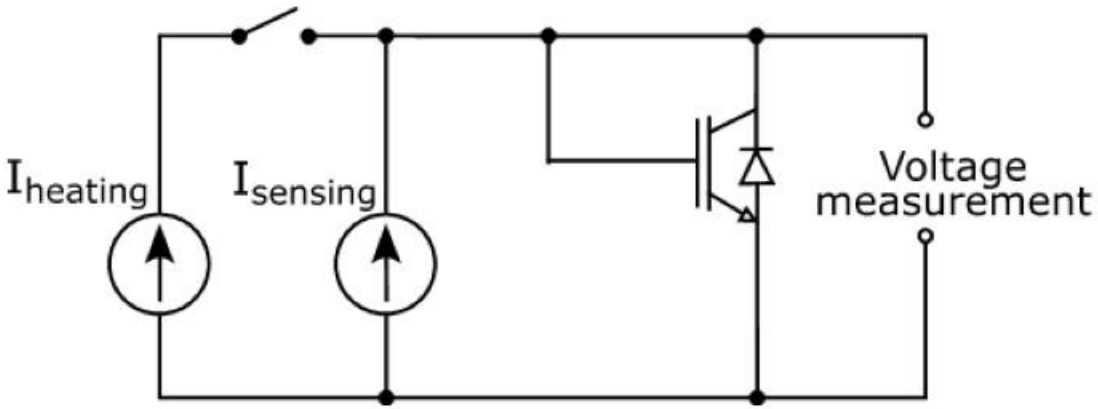


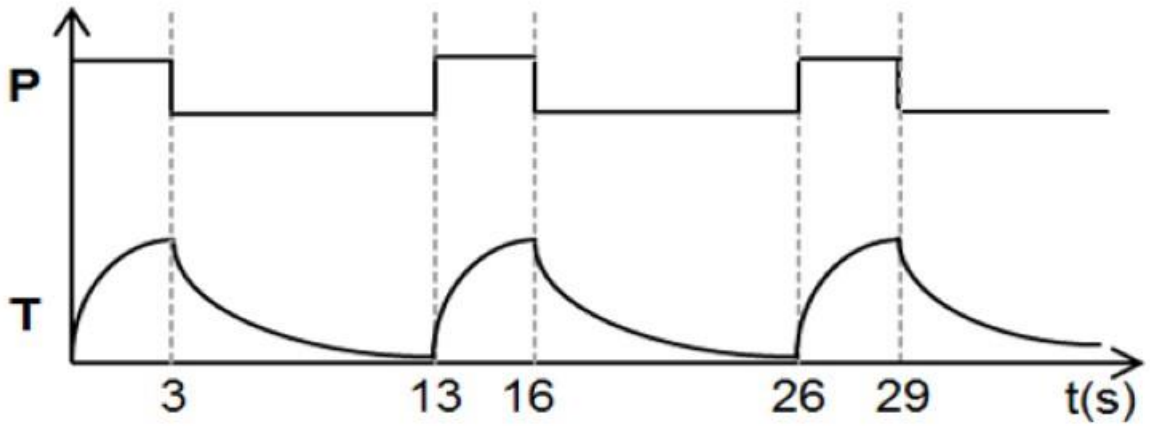


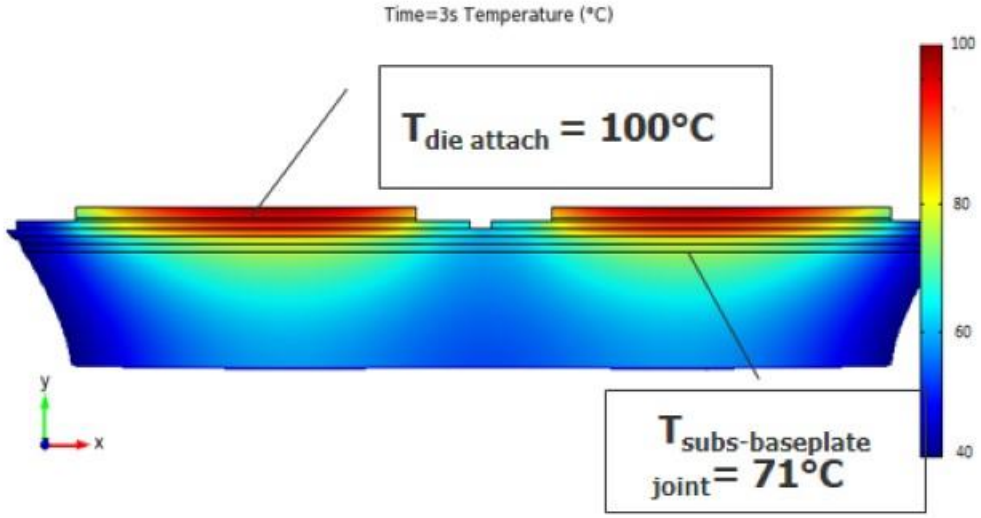
© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

Chip rögzítés romlása I.
Kísérleti összeállítás

- Hűtőlap hőmérséklet: 25° C
- Célzott maximális chip hőmérséklet: 125° C (kezdeti ΔT_j = 100° C)
- Fűtőteljesítmény: 200W @ 25A



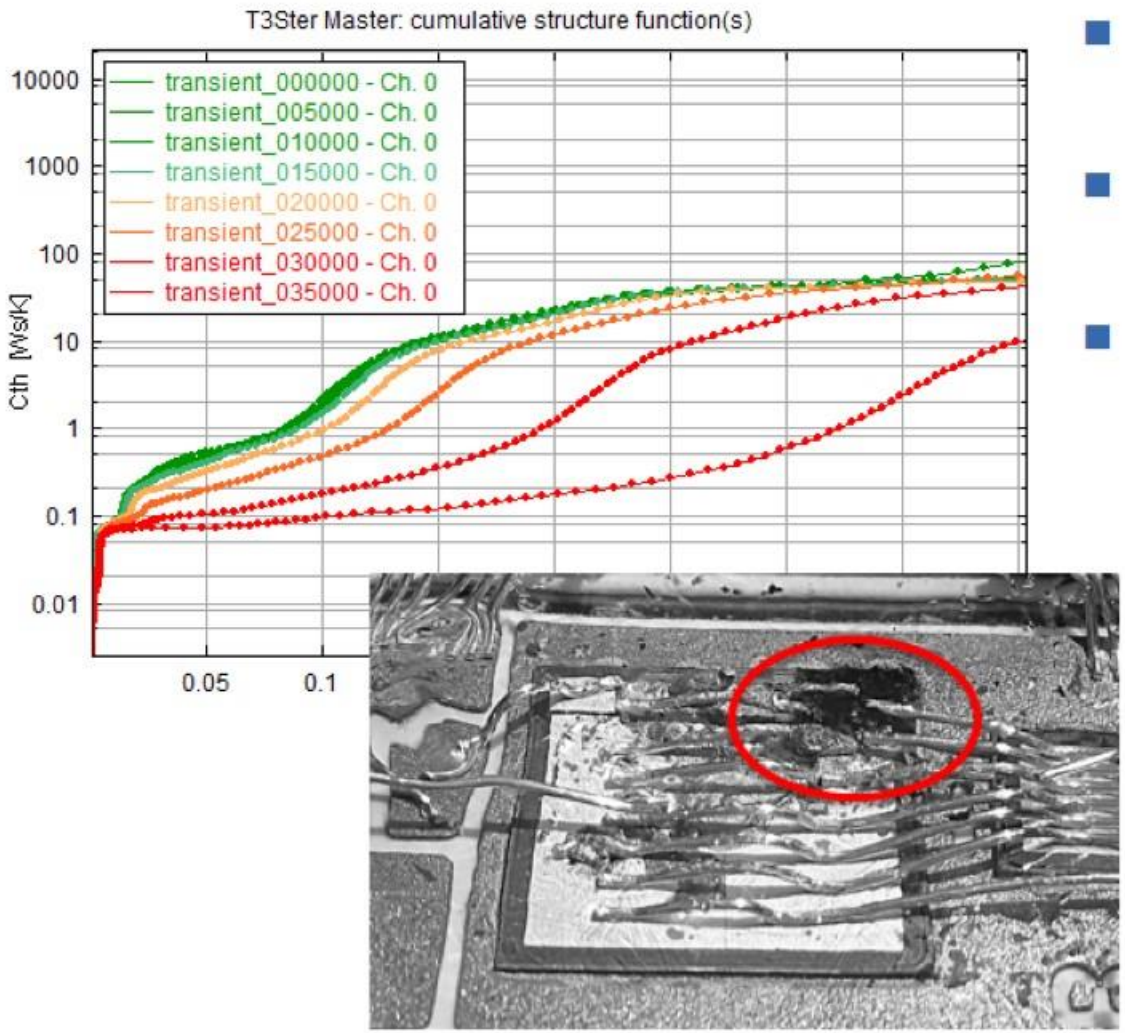




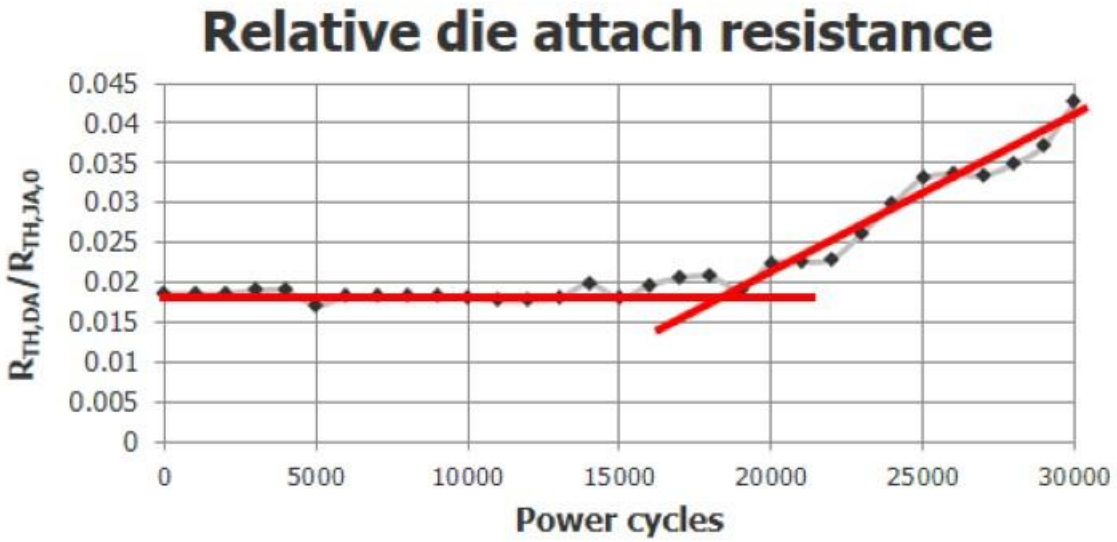
- Állandó áramú fűtés függetlenül az eszköz paraméteretinek esetleges romlásától
- Tranziens mérés minden 200 ciklus után

© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

Chip rögzítés romlása II.
Kísérleti eredmények

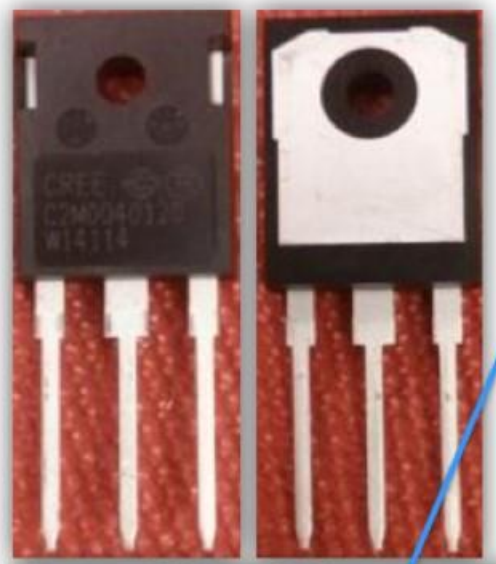


- Chiprögzítő réteg fokozatos romlása figyelhető meg ~10,000-15,000 ciklustól kezdődően
- Modul meghibásodását végül a bond vezetékek megszakadása okozta ~30,000 ciklus után
- Ok-okozati viszony feltételezhető

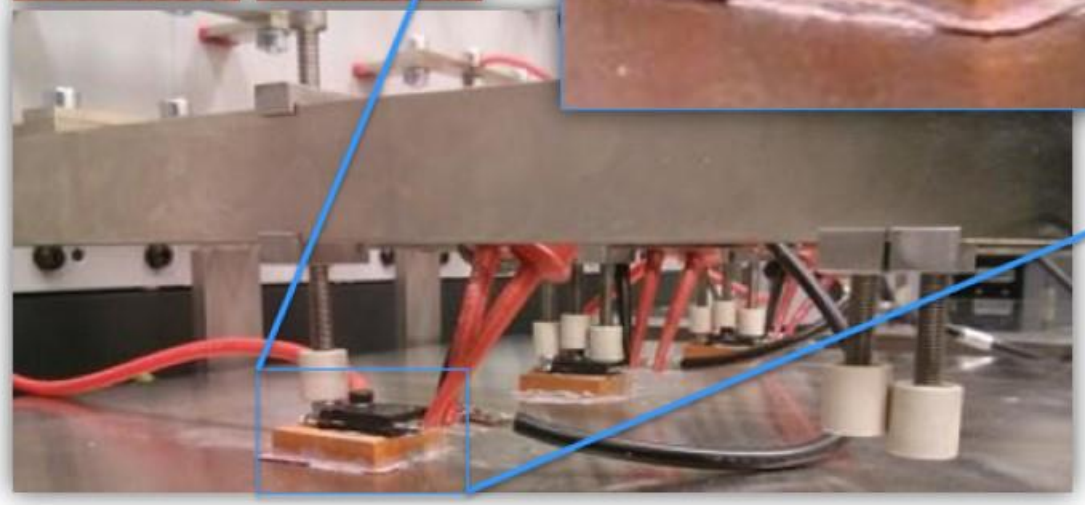


© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

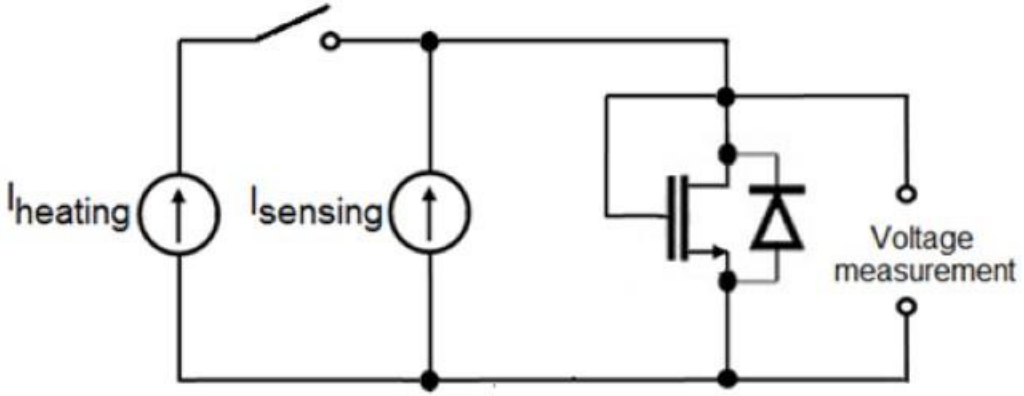
Egyidejű hibajelenségek I.
Kísérleti összeállítás



SiC Power MOSFET 1200V, 40A

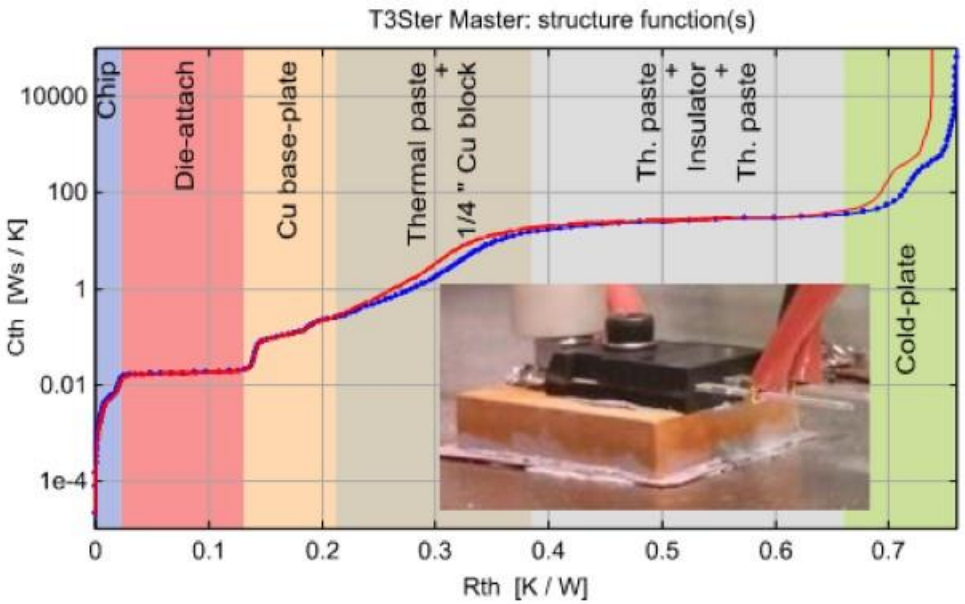


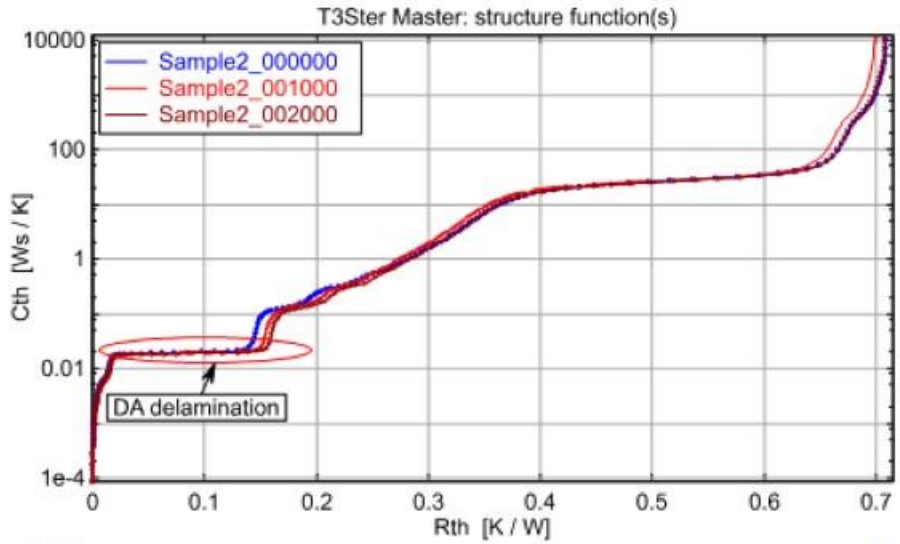
I_{load}	24 A
ΔP	~65 W
ΔT	~92 °C
$T_{Heating}$	10 s
$T_{Cooling}$	10 s

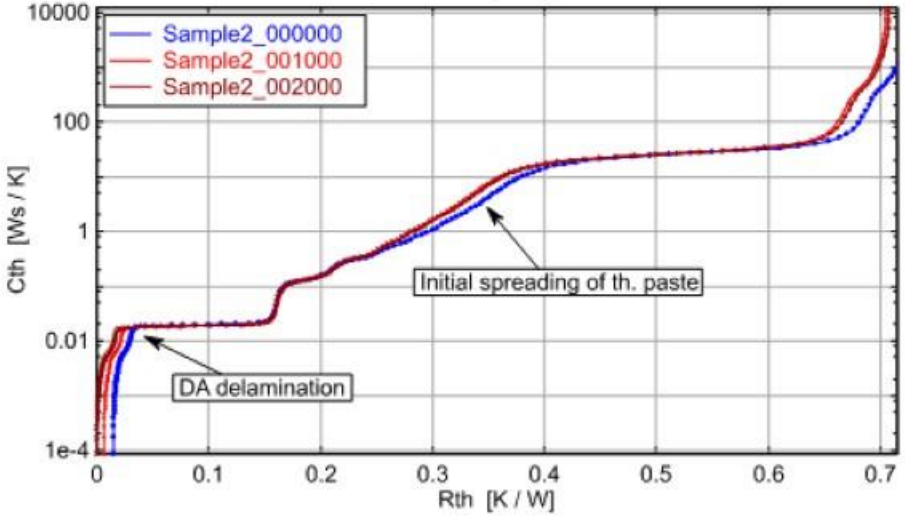


© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

Egyidejű hibajelenségek I.
Rejtett hibák felfedése







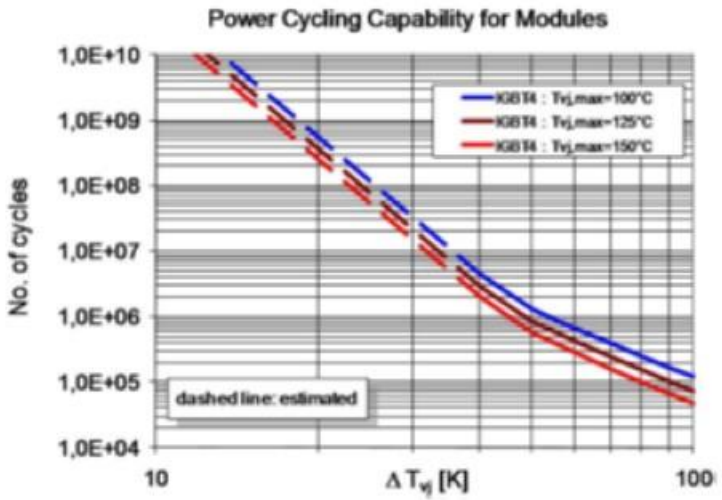
- Struktúra elemeit először azonosítani kell (a kék és piros görbék két eltérő TIM anyag alkalmazásával lettek mérve)
- A chiprögzítés romlása és a TIM anyag hőellenállásának csökkenése egyidejűleg figyelhető meg a görbék nem origóban való illesztésével

© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

MÉRT ÉLETTARTAMOT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

Mért élettartamot befolyásoló tényezők

A tesztek során felismertük, hogy még látszólag azonos kezdeti paraméterek esetén is lehet eltérő a mért élettartam. Számos paraméter befolyásolja:



- Hűtés
  - Azonos hőmérsékeltváltozás különböző hőellenállás és fűtőteljesítmény páros esetén is elérhető
- Tesztelési folyamat szabályozása
  - Terhelési paramétereket miként szabályozzuk a modul megváltozása esetén (feszültségesés változása, Rth növekedés)
- Elektromos bekötés
  - Milyen kapcsolás mellett, milyen áram és feszültség kombinációval érjük el a célzott hőmérséklet változást

Általános vélekedés, hogy az élettartam meghatározásához a valós alkalmazási környezethez leghasonlóbb módon kell tesztelni

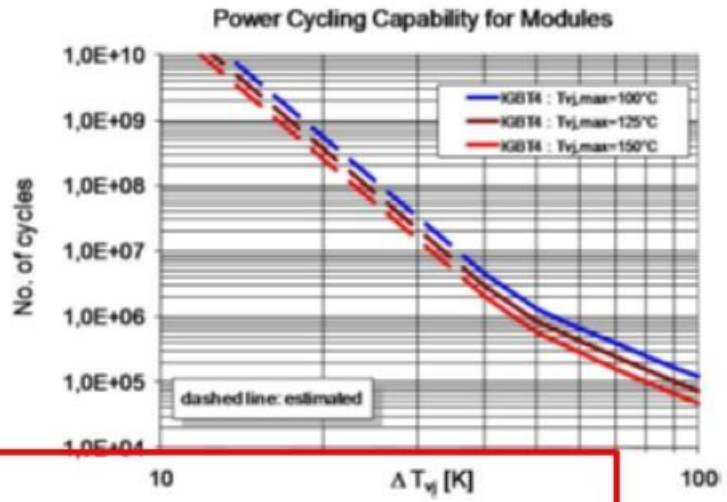
- Mi is az valójában?
- Mindig ez az optimális stratégia?

A kísérlet célját már a teszt tervezés során figyelembe kell venni a megfelelő paraméterek meghatározásához.

© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

Mért élettartamot befolyásoló tényezők

A tesztek során felismertük, hogy még látszólag azonos kezdeti paraméterek esetén is lehet eltérő a mért élettartam. Számos paraméter befolyásolja:



- Hűtés
  - Azonos hőmérsékeltváltozás különböző hőellenállás és fűtőteljesítmény páros esetén is elérhető
- Tesztelési folyamat szabályozása
  - Terhelési paramétereket miként szabályozzuk a modul megváltozása esetén (feszültségesés változása, Rth növekedés)
- Elektromos bekötés
  - Milyen kapcsolás mellett, milyen áram és feszültség kombinációval érjük el a célzott hőmérséklet változást

Általános vélekedés, hogy az élettartam meghatározásához a valós alkalmazási környezethez leghasonlóbb módon kell tesztelni

- Mi is az valójában?
- Mindig ez az optimális stratégia?

A kísérlet célját már a teszt tervezés során figyelembe kell venni a megfelelő paraméterek meghatározásához.

© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

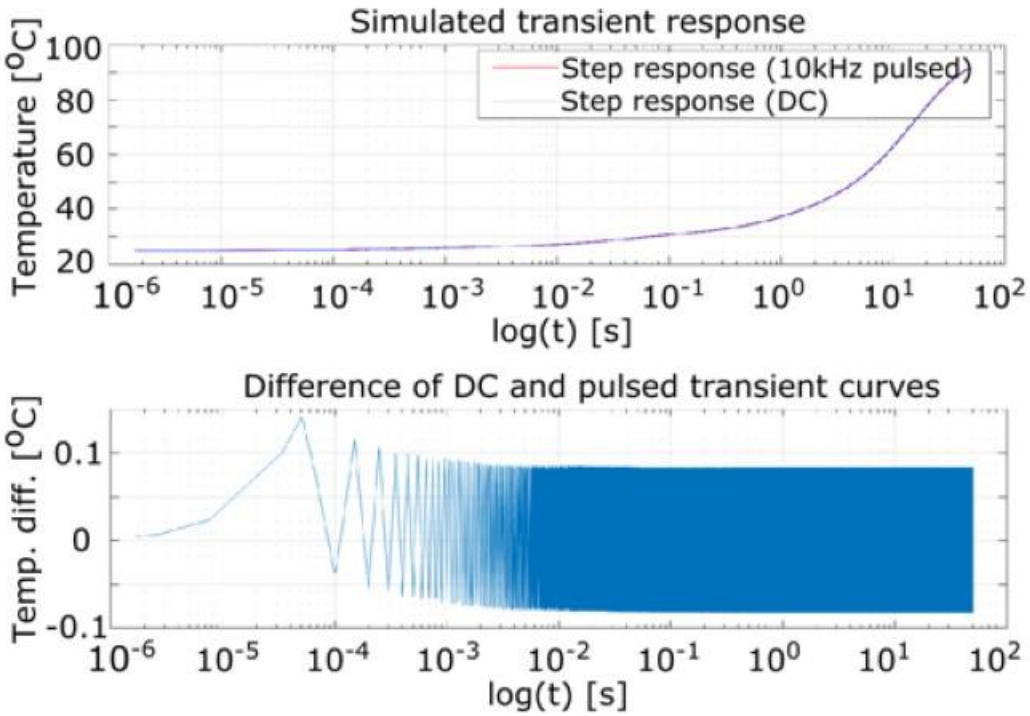
Elektromos bekötés I.

Jellemző alkalmazásban

- kapcsoló üzemű meghajtást alkalmaznak
  - Hőmérséklet nem tudja lekövetni a gyors változásokat
- **állandó feszültségű forrásról** táplálják
  - A feszültség nagy része a terhelésen esik, így a terhelő induktivitás határozza meg az átfolyó áramot

Tehát a valós alkalmazást jól közelíti az **áramgenerátoros** meghajtás

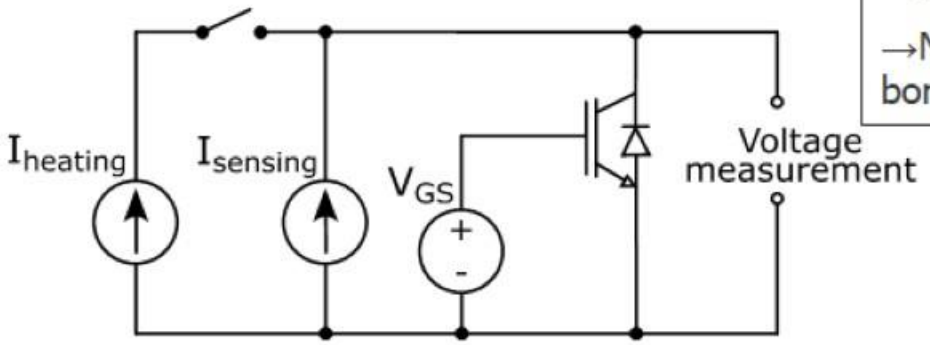
- Azonban ez figyelmen kívül hagyja a kapcsolási veszteségeket...



© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

Elektromos bekötés II.

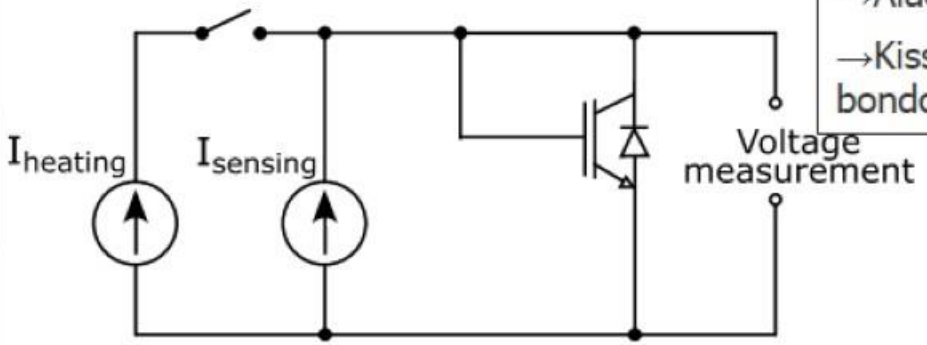
Nyitott állapot



→Nagy áram

→Nagy terhelés a bond vezetékeken

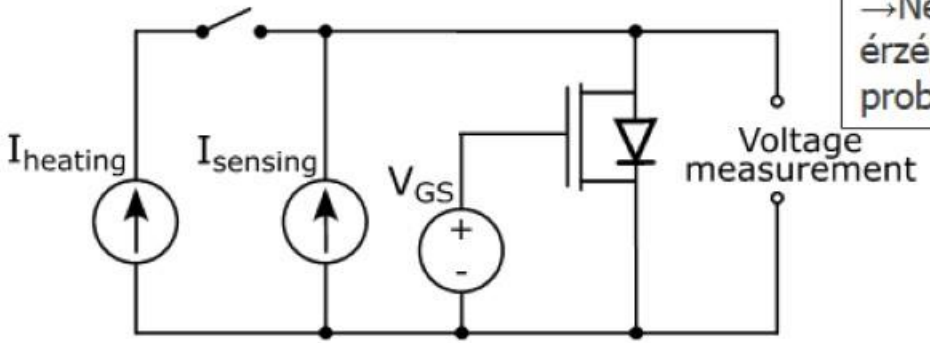
„MOS DIODE" (Küszöbfeszültség mód)



→Alacsonyabb áram

→Kissebb terhelés a bondokon

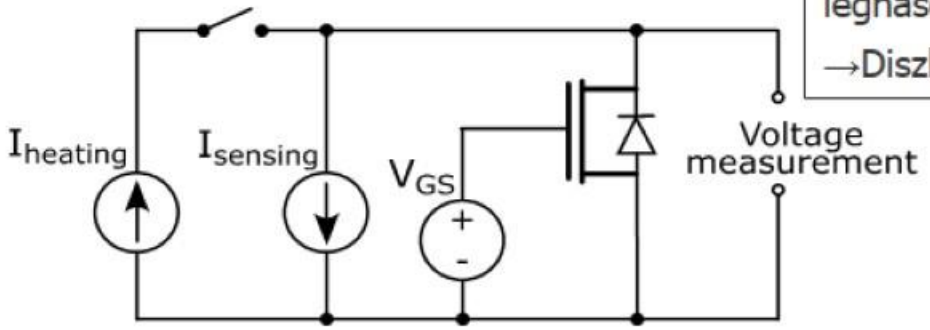
MOSFET parazita dióda



→Klasszikus megoldás

→Negatív hőmérséklet érzékenység problémát okozhat

MOSFET nyitott csatorna



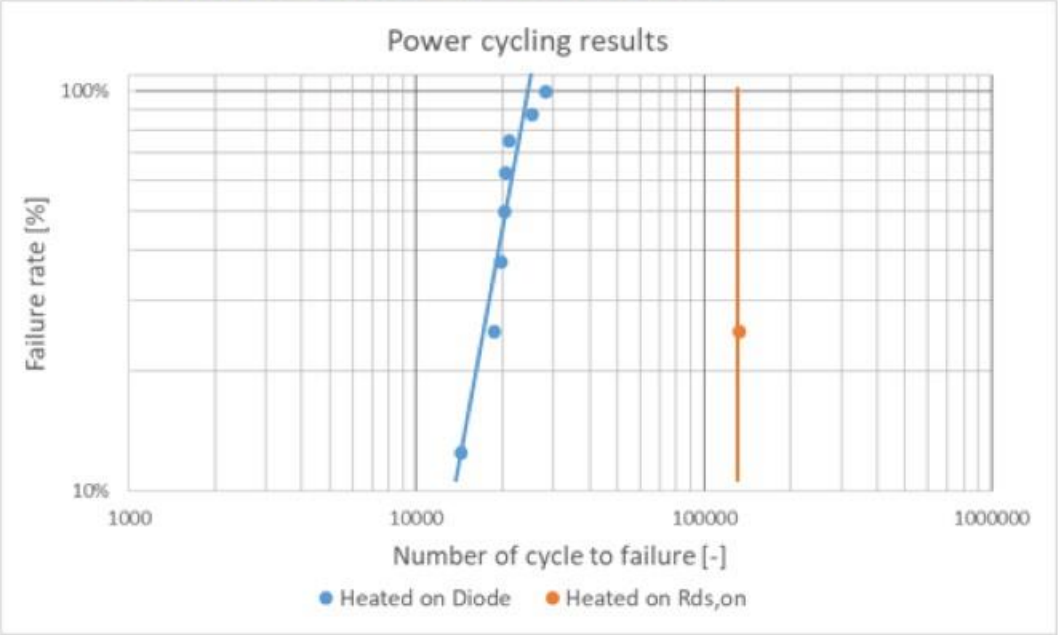
→Valós alkalmazáshoz leghasonlóbb

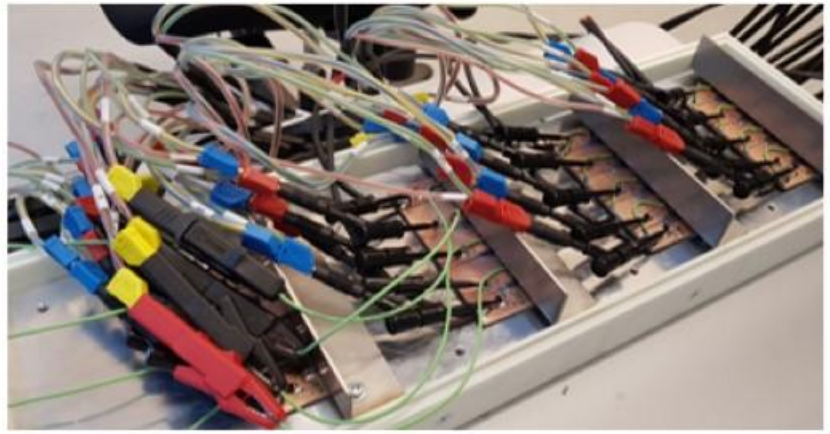
→Diszkrét dióda?

© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

Elektromos bekötés III. Példa

- E két MOSFET meghajtási mód eredményét vetettük össze egy 600V-os nagyfeszültségű MOSFET esetében
- Eredmények
  - Dióda módban fűtott tranzisztorok kevesebb, mint 30k ciklus után meghibásodtak
  - Nyitott állapotban fűtve több, mint 130k ciklus után ment tönkre az első eszköz





- Minták
  - 8 MOSFET parazita diódán fűtve
  - 4 MOSFET csatorna ellenálláson
- Főbb paraméterek megegyeztek
  - Hőmérséklet változás: ~100°C
  - Hűtőlap hőmérséklet: 25°C
  - Fűtési/Hűlési idő: 5s/5s
  - $I_{heating,Diode}$: ~60A; $I_{heating,Rdson}$: ~20A
  - Nyitott csatornán való fűtés esetén volt lehetőség a terhelés kiegyenlítésére a gate feszültség szabályozásával (jelen szabványok megengedik)

© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

Eredmények összefoglalása

A bemutatott munka során vizsgáltuk

- Meghibásodási módok felismerhetőségét és hatásaik szétválaszthatóságát
  - bond vezetékek,
  - chip rögzítő réteg,
  - és egyéb rétegek romlása.

  Azt találtuk, hogy a fenti hibák jól detektálhatóak és hatásuk a mért paraméterekre megfelelő előkészületek esetén (pl. hőmérséklet érzékenység kalibráció fűtőáramon) elkülöníthetőek.
- Mérési paraméterek hatását a mért élettartamra
  - Hűtési megoldások hatása
  - Szabályozás stratégiák fontossága
  - Elektromos bekötés szerepe

  A mérési beállítások (pl. áram és feszültség viszonyok) megváltoztatásával a terhelés jellege módosítható, nem megfelelő választással a teszt eredménye akaratlanul is befolyásolható

© Mentor Graphics Corp. Company Confidential

Eredmények hasznosítása

- A teljesítmény ciklálás és termikus tranziens mérés integrálásával létrehozott rendszer egy hasznos eszköznek bizonyult a teljesítmény modulok élettartam vizsgálatában (különösen fejlesztési fázisban)
- A mérési elrendezést számos autóipari szereplő vette át világszerte, különösen Japánban, Kínában és Ázsia egyéb területein
- Mindeközben dolgozunk az ECPE (European Center for Power Electronics) AQG324 munkacsoportban, hogy jobb ajánlásokat nyújtson a teljesítmény modulok minősítéséhez a pontosabb, összehasonlíthatóbb teszt eredmények érdekében

(ECPE Guideline AQG 324 - Qualification of Power Modules for Use in Power Electronics Converter Units (PCUs) in Motor Vehicles)

© Mentor Graphics Corp. Company Confidential