

Optimizacija izdelave močnostnih modulov ter termična analiza

Aleksander Sešek¹, Tadej Skuber¹, Kostja Makarovič²

¹Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana

²Keko Equipment, Grajski trg 15, 8360 Žužemberk

E-pošta: aleksander.sesek@fe.uni-lj.si

Power module production optimization and thermal analysis

Abstract. In the paper, the material selection, bonding and soldering issues of power modules are presented, together with thermal and electrical measurements. It is shown that the best material, regarding thermal properties, is AlN, but due to incompatibility with 3D production process, Alumina and LTCC ceramics are agreeable selections.

1 Uvod

Elektronski močnostni moduli so dandanes uporabljeni pri vsakem elektromotorju [1]. Optimizacija njihovega delovanja je izziv podjetij, ki električne pogonske sisteme ponujajo na trgu in je za vsakega od pogonov specifična [2]. Tako se za določen elektromotorski sistem optimizira vsako od komponent ločeno, vendar tudi skupaj kot sistem. Optimizira se konstrukcija elektromotorja [3], njegova povezava na močnostni modul [4], močnostni modul [5], krmilno vezje [6], [7] ter hlajenje vsake od komponent ali celotnega sistema [8]. Vsaka od optimizacij zahteva posebne pristope, orodja, simulacije in meritve.

Ker so krmilni sistemi za močnostne module že optimizirani, se prilagajajo le posamezne enote in še to programsko [9]. Pri močnostnih moduli pa so optimizacije v smeri zmanjšanja parazitnih elementov [10], postavitve elektronskih močnostnih elementov [5], izbire materialov za osnovne plošče modula [11] ter povezljivostjo elementov in modulov [12], itd.

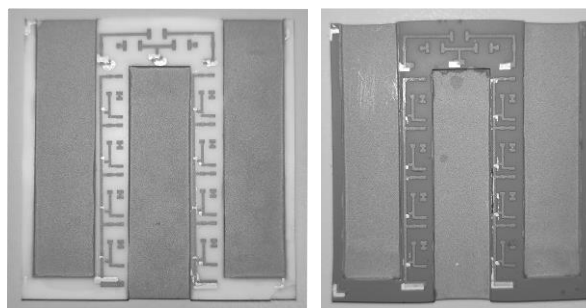
V tem prispevku smo se posvetili inovativnim procesom izdelave močnostnega modula, ki temelji na uporabi različnih vrst keramike, uporabe naprednih 3D aplikacijskih tehnologij ter možnosti nanosa različnih snovi v enovitem postopku izdelave modula. V prvem poglavju so opisani različni materiali in težave pri njihovi uporabi in izdelavi modula. Sledijo osnovne termične meritve, kjer sta bila testirana dva najprimernejša materiala ter potrditvena električna meritev DPT [13].

2 Izbira materiala osnovne plošče

Tehnologija, ki se uporablja v dotičnem primeru je imenovana »Direct Copper Bonding« (DCB) ali pa »Direct Aluminum Binding« (DAC) [14]. Obe tehnologiji sta v nasprotju z osnovno tehnologijo integriranih vezij »Printed Circuit Board« (PCB), bolj kompleksni. PCB tehnologija uporablja večplastno tehnologijo epoksi laminatov (debelina plasti laminata

je od 200 μm pa do 1500 μm) z nanosom tankih bakrenih plasti (debelina bakra v posamezni plasti je 35 μm) za električne povezave. DCB tehnologija pa je osnovana največkrat na eni sami keramični plasti (debelina keramike je 500 μm) na katero sta obojestransko nanešeni debeli plasti bakra, kot prevodnika za električne povezave (debeline plasti so 100 μm in več).

V našem primeru je bil uporabiljen postopek izdelave večplastne keramične strukture, znan iz proizvodnje senzorskih struktur. Gre za uporabo po plasteh različno oblikovane keramike, ki se žge pri nizkih temperaturah (pod 1000 °C) t.i. LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) keramike [15], primerjalno pa smo uporabili tudi keramiko Al_2O_3 (Alumina) [16], ki je osnova DCB struktur. 3D strukture se uporabljajo za planarizacijo električnih povezav stikalnih elementov in napajalnih povezav. Fotografiji obeh testnih močnostnih modulov sta predstavljeni na sliki 1.

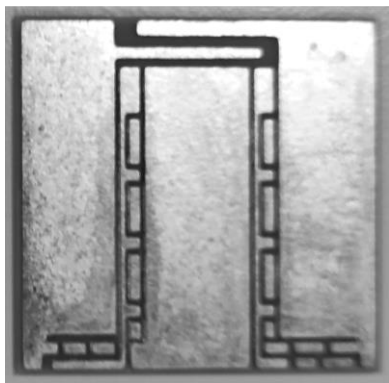


Slika 1. Močnostni modul iz večplastne Alumine ter večplastne LTCC keramike

Na sliki 1 levo je vidna osnova modula iz Alumine, na katero je nanesena tanka plast metalizacije. Plasti Alumine so v tem primeru debele 500 μm . Na enak način je izdelana tudi desna ploščica iz LTCC keramike na desni. Ti moduli so narejeni po plasteh, ki se jih lahko prilagaja po debelini in spaja med seboj. Nanos metalizacije je narejen po zlaganju keramične strukture, se pa hkrati s strukturo žge. V dolga, poglobljena in metalizirana področja modula se kasneje prispajka, hkrati z elektronskimi elementi, bakrene tokovodnike. V primeru Alumine, sočasno žganje z metalizacijo ni možno, zaradi previsoke temperature sintranja Alumine in nizke temperature tališča tipičnih materialov za metalizacijo (Ag, Pd, Cu, .. ipd).

Pri uporabi novejšega materiala – aluminijevega nitrida (AlN) za izdelavo močnostnih modulov, smo se morali omejiti zgolj na 2D strukturo, kajti AlN zahteva sintranje v inertni atmosferi ali vakumu pri 1800 °C.

Zapleten je tudi postopek nanosa metalizacije. AlN je dielektrik, ki ima nenavadno visoko temperaturno prevodnost. Zato smo naročili izdelavo modula za primerjavo lastnosti, ki je dimenzijsko enak 3D modulu, le da se v tem primeru bakrene tokovodnike prispajka na površino modula in se s tem izgubi planarizacija napajalnih povezav. Pri tem modulu gre za laminat s kombinacijo baker – AlN – baker, vsi po debelini enaki (500 μm). Obdelava modula je narejena z krmiljenim rezkarjem. Modul je prikazan na sliki 2.



Slika 2. Osnovna plošča močnostnega AlN modula

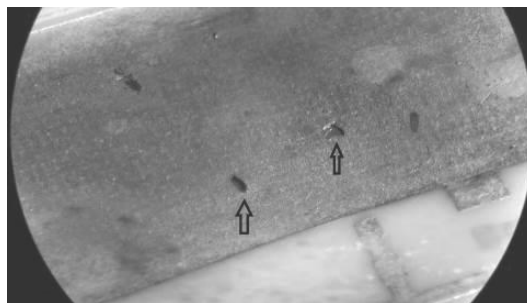
AlN je kot osnovni material zanimiv za uporabo v močnostni elektroniki, ker je izredno termično prevoden. Za primerjavo termične prevodnosti smo uporabili prav tako planaren modul Alumine. Rezultati so predstavljeni v poglavju o termičnih lastnostih modula iz AlN in Al_2O_3 .

Za izvedbo tako termičnih kot električnih meritev keramičnega AlN modula s pritrditvijo elementov nismo imeli težav. Vsi elementi so se na čisti baker lepo spajkali, prav tako bondiranje z aluminijevo žico ni bilo težavno. Na težave pa smo naleteli pri poizkusu bondiranja in spajkanja na metalizacijo Alumine in LTCC keramike. Te težave smo reševali na 3D strukturah. Glavni poudarki in rešitve so predstavljeni v naslednjem poglavju

2.1 Metalizacija in bondiranje keramičnih struktur

Pri metalizaciji keramičnih struktur so najpomembnejši trije parametri: oprijem kovine na keramiko, dobra električna prevodnost ter možnost bondiranja. V procesu izdelave večplastnih keramičnih struktur, nanos bakrene plasti ne pride v poštev. Uporablja se razne kombinacije past z različno vsebnostjo srebra, zlata paladija, platine ipd. Plasti takih metalizacij so tanke, zagotavljajo dobro oprijemljivost in veliko električno prevodnost, ne zagotavljajo pa dobre osnove za bondiranje. Za osnovni material je bila tako izbrana mešanica srebra in paladija, ki je enostavna za uporabo in zagotavlja dober oprijem, bondiranje nanjo pa ni možno. Najprej so bili narejeni poizkusi z dodatnim nikljanjem (Ni) plasti, ki naj bi zagotovilo dovoljšno oprijemljivost bondov, kar pa se ni izkazalo za pravilno domnevo. Bondi različnih presekov in uporaba različnih

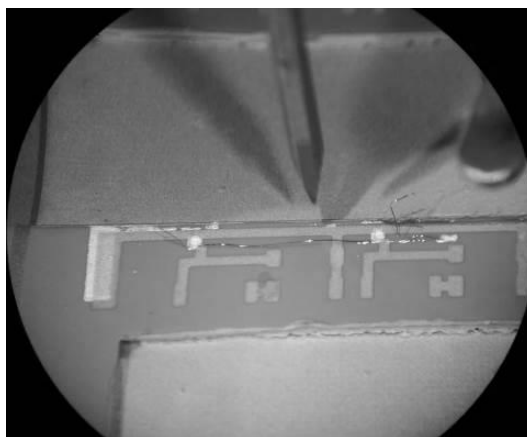
moči bondiranja, hkrati s segrevanjem niso uspeli. Naslednji poizkus je bila dodatna aplikacija kositra (Sn) na površino, ki je površino niklja nekoliko spremenila in s tem površinsko strukturo razbrazdala, kar je v večini primerov čistih debelopalstnih metalov omogočilo bondiranje. V našem primeru pa se ta rešitev ni izkazala za pravilno. Na sliki 3 lahko vidimo kovinsko površino z prej omenjenimi nanosi kovin in vdolbinice, ki so ostale po neuspešnem bondiranju.



Slika 3. Neuspešno bondiranje na kombinacijo Ag-Pd + Ni + Sn strukturo

Izkazalo se je, da ultrazvočni pritisk na strukturo sicer povzroči stik med bondirno žico, vendar povzroči zaradi strukturnega pritiska na adhezijsko plast odstop osnovne Ag-Pd plasti od keramike. Na mestu pritiska ostanejo področja brez kovine, ki ostane sprijeta na bondirno žico. Območja so označena z puščico.

Ker so dodatni nanosi metalov povzročili nekakšno plavajočo strukturo, ki se na pritisk ni odzvala zadovoljivo smo se poslužili najenostavnejše izvedbe in sicer lokalnega srebrenja površin namenjenih bondiranju. Srebro samo je namreč ustrezno za bondiranje, vendar je nanos le tega na osnovno Ag-Pd metalizacijo lahko neuspešen, saj se ob segrevanju porazgubi v paladiju in zopet ne omogoči bondiranja. Prav tako se ob predebelem nanosu obnaša kot blazina, ki ob ultrazvočnem bondiranju ne omogoča dovolj trdne podlage za oprijem. Ob testiranju različnih debelin smo odkrili pravšnjo, ki je vsaj v razmerju 1:2 z osnovno plastjo. Fotografija uspešnega bondiranja je predstavljena na sliki 4.

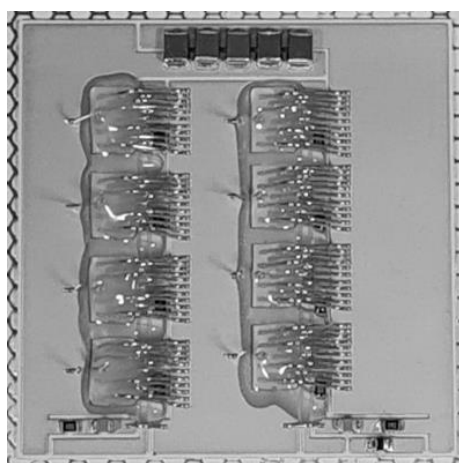


Slika 4. Uspešno bondiranje na srebrno površino

Na sliki 4 so prikazani bondi z 50 μm Al žico med področji nanešenega srebra. Vidna so tudi okovinjena področja brez nanosa srebra sivo, poglobljeni del keramike in bondirna kapilara na sredini slike. Bondi, pri katerih je uporabljena tanjša 50 μm žica so uporabljeni v primeru kontrolnih in krmilnih povezav, medtem ko so močnostni bondi narejeni z 380 μm žico in omogočajo večje tokovne gostote.

3 Močnostni modul

Močnostni modul iz Alumine, ki je bil vzet za primerjavo z AlN modulom je prav tako planaren, 2D. Z uporabo tega nadomestka 3D modula ne vplivamo na termične lastnosti oziroma prenos toplote na hladilno telo, ki je spodaj, ampak zgolj enačimo strukturo za primerjavo – dolžine in pozicije bondirnih žic in priključkov. Končni modul iz Alumine, ki je uporabljen tudi v trifaznih sistemih, je prikazan na sliki 5.



Slika 5. Močnostni modul iz Alumine z nameščenimi elektronskimi komponentami

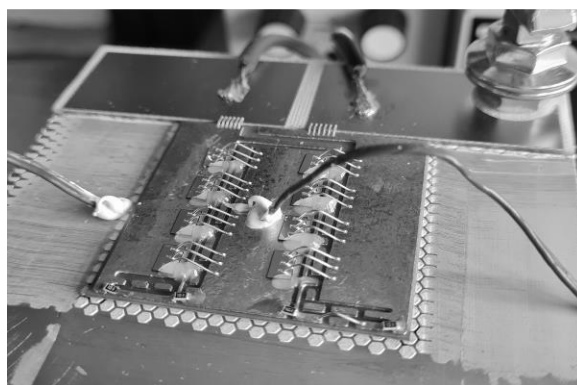
Dimenzijsko torej popolnoma ujemajoč modul z enakimi debelinami keramičnega substrata in tudi enakimi elektronskimi komponentami je bil uporabljen za termične in električne meritve. Na sliki 5 se vidi dvakrat po 4 močnostne tranzistorje, ki predstavljajo spodnji in zgornji preklopni element, bondirne žice do ustreznih bakrenih povezav, pod njimi in tudi na spodnji strani ploščice pa elektronske komponente za krmiljenje modula ter za meritev temperature na plošči.

3.1 Meritev termične upornosti modula

Za meritev termične prevodnosti smo izbrali klasično hladilno telo z prisilnim hlajenjem. Modula sta bila na hladilno telo pritrjena s pomočjo vijaka, prav tako pa je bila površina hladilnega telesa pred tem premazana z termično prevodno pasto, ki omogoči prenos toplote v primeru neravnih površin. Slika 6 predstavlja namestitev modula za termične meritve.

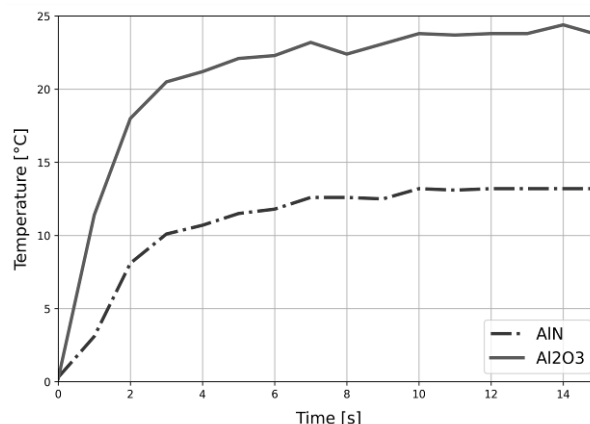
Oba modula smo priključili na baterijsko napajanje in ju krmilili tako, da smo dosegli želen nivo trošene moči na modulu. Ker je bil v primeru teh meritev dostop do temperaturnega senzorja onemogočen, smo namestili dodatne temperaturne senzore s pomočjo termične

paste na sredino modula ter na hladilno telo, kot je razvidno iz slike 6.



Slika 6. Test termične upornosti osnovne plošče modula

Graf na sliki 7, prikazuje potek temperaturne razlike na modulih pri 100 W trošene moči. Iz grafa je razvidno, da je na AlN skoraj dvakrat manjša temperaturna razlika kot na Alumini, kar pomeni da je ta material boljši za prenos toplote oziroma hlajenje močnostnih komponent.



Slika 7. Temperaturna razlika dT na modulih

V tabeli 1 so zbrani tudi numerični rezultati meritev temperaturne razlike pri 20 W, 50 W in 100 W trošene moči. Trošena moč pomeni v našem primeru vsa moč, ki se troši na modulu in je seštevek uporovnih in preklopnih izgub. Debelina keramike je bila 500 μm .

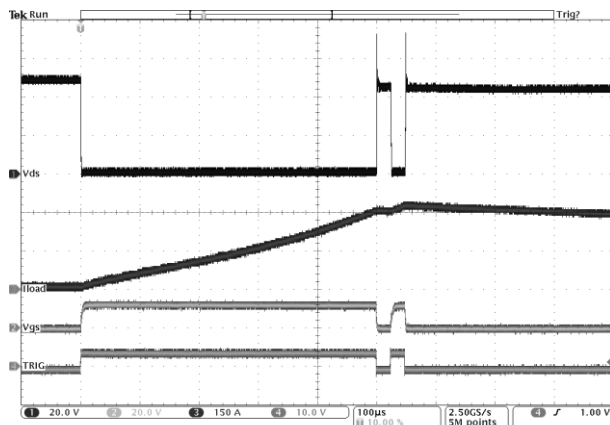
Tabela 1. Meritve prenosa toplote preko keramične osnove

Trošena moč [W]	dT Al2O3 [°C]	dT AlN [°C]	Rth Al2O3 [°C/W]	Rth AlN [°C/W]
20	4.5	3	0.225	0.15
50	11.5	7	0.23	0.14
100	24	13	0.24	0.13

Termična upornost se s količino trošene moči skoraj ne spreminja. Prav tako ostaja enako razmerje med termično upornostjo Alumine in AlN – 1.85. Ta faktor v splošnem pomeni, da se bo za isto trošeno moč na modulu, modul na Alumini dvakrat bolj segrel. Razmerje med Alumino in LTCC je podobno, v korist Alumine.

3.2 Test dvojnega pulza

Za dokončno potrditev ustreznosti delovanja modula na izbrani AlN je bil opravljen tudi test dvojnega pulza (Double Pulse Test – DPT). Test je velikokrat uporabljen v testih močnostne elektronike, saj pokaže vse glavne lastnosti modula in potrdi predpostavljeno delovanje. Pri modulu se uporabi kot stikalni tranzistor spodnji tranzistor, zgornji tranzistor je vedno v neprevodnem stanju. Na zgornji strani tako deluje zaščitna dioda. Modul priključimo na 48 V DC napetostni vir in mu priključimo umetno breme – induktivnost v območju predvidenega elektromotorja. Signalni generator proizvaja pulze in krmili močnostni modul. Ob prvem pulzu gonilnik omogoči spodnje tranzistorje za 500 μ s, tok steče čez induktivno breme. Na tuljavi se shrani magnetna energija. Nato se spodnji tranzistor izklopi za 25 μ s in ponovno vklopi za 25 μ s. V teh preklonih lahko opazujemo preklonne pojave na kanalu tranzistorja, kar nam da vpogled v velikost parazitnih komponent in ustreznost kompenzacije. Tipične krivulje signala in rezultati meritev so prikazani na sliki 8.



Slika 8. Test dvojnega pulza

Zgornja krivulja na sliki 8 predstavlja padec napetosti na kanalu preklonnega tranzistorja, ki so v območju napajalne napetosti (48 V), maksimalni prenehaji pa dosežejo 72 V. Opazno je tudi nekaj prenehajev, ki so posledica lastnih nihajnih krogov modula. Druga krivulja, od zgoraj navzdol, prikazuje potek toka preko bremena – razdelek pomeni 150 A – kar nam da vrednost toka 300 A v prvem delu vključitve toka, ter po vmesni prekinitvi 330 A končnega toka. Tok se po izključitvi prazne preko zaščitne diode. Spodnja dva signala predstavljata krmilna signala in sicer je spodaj prvi signal pulznega generatorja, drugi pa signal na vratih tranzistorja, kjer je vidna kapacitivnost in upornost prilagoditvenega vezja. Iz danega testa lahko ugotovimo vse parametre tako stikalnih elementov, kot elektronskih komponent in jih po potrebi prilagodimo. DPT test je pokazal, da je modul primeren za uporabo in z dano topologijo elementov, kot tudi z

danim materialom in termično upornostjo, predstavlja izboljšano različico osnovnega modula.

4 Zaključek

Prispevek predstavlja rešitev dveh glavnih problemov pri izdelavi in uporabi močnostnih modulov. Prvi je optimizacija obdelave osnovne plošče močnostnega modula – keramične ploščice (Alumina in LTCC keramika) za namestitev elektronskih komponent, kot so bondiranje in spajkanje. Drug problem pa je zmanjšanje termične upornosti modula z uporabo novega materiala AlN. Predstavljeni sta rešitev za namestitev in povezavo komponent, prav tako pa tudi termične meritve AlN modula in njegove primerjave z Alumino.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo Evropskemu skladu za regionalni razvoj za sofinanciranje projekta ASAM (Interreg Slovenija-Avstrija), katerega del so bile raziskave opisane v članku. Zahvaljujejo se tudi Mitji Brlanu za bondiranje močnostnih modulov.

Literatura

- [1] 'Sridhar - 2019 - Power Electronics in Motor Drives Where is it.pdf'. Accessed: Jul. 23, 2021. [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/wp/slyy078a/slyy078a.pdf?ts=1627043750201&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [2] F. Un-Noor, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, M. N. Mollah, and E. Hossain, 'A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development', *Energies*, vol. 10, no. 8, Art. no. 8, Aug. 2017, doi: 10.3390/en10081217.
- [3] M. A. Ilgaz, S. Corovic, A. Alic, D. Makuc, M. Vukotic, and D. Miljavec, 'The magnetic and thermal modelling of the electrical machines', in *2020 Photonics North (PN)*, May 2020, pp. 1–1. doi: 10.1109/PN50013.2020.9166957.
- [4] L. Verkroost, J. Van Damme, H. Vansompel, F. De Belie, and P. Sergeant, 'Module Connection Topologies and Interleaving Strategies for Integrated Modular Motor Drives', in *2019 IEEE International Electric Machines Drives Conference (IEMDC)*, May 2019, pp. 559–564. doi: 10.1109/IEMDC.2019.8785248.
- [5] A. Sešek, T. Skuber, and J. Trontelj, 'Analiza močnostnih modulov za učinkovito krmiljenje elektromotorjev', in *Zbornik devetindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2020 = Proceedings of the Twenty-ninth International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK 2020*, Portorož, Slovenia, 22.9 2020, pp. 16–19.

- [Online]. Available: <https://erk.fe.uni-lj.si/2020/ERK20.pdf>
- [6] I. T. AG, 'Solutions for gate driver and power switches - Infineon Technologies'. <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/gate-driver-ics/solutions-for-gate-driver-and-power-switches/> (accessed Jul. 23, 2021).
 - [7] I. T. AG, 'Gate Driver ICs - Infineon Technologies'. <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/gate-driver-ics/> (accessed Jul. 23, 2021).
 - [8] D. Karimi, H. Behi, J. Jaguemont, M. El Baghdadi, J. Van Mierlo, and O. Hegazy, 'Thermal Concept Design of MOSFET Power Modules in Inverter Subsystems for Electric Vehicles', in *2019 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)*, Dec. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICPES47639.2019.9105437.
 - [9] 'VESC Project'. <https://vesc-project.com/> (accessed Jul. 23, 2021).
 - [10] C. Laurant *et al.*, 'Very low parasitic inductance double side cooling power modules based on ceramic substrates and GaN devices', in *2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, Jun. 2020, pp. 1402–1407. doi: 10.1109/ECTC32862.2020.00222.
 - [11] 'Choosing Among Ceramic Substrates for Power Circuits - Technical Articles'. <https://eepower.com/technical-articles/choosing-among-ceramic-substrates-for-power-circuits/> (accessed Jul. 23, 2021).
 - [12] N. Jiang, Z. Li, C. Li, Q. Wang, S. Zhang, and Y. Lin, 'Bonding Wires for Power Modules: from Aluminum to Copper', in *2019 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC)*, Jun. 2019, pp. 1–3. doi: 10.1109/EDSSC.2019.8754216.
 - [13] '2020 - Double Pulse Testing The How, What and Why.pdf'. Accessed: Jul. 23, 2021. [Online]. Available: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Double_pulse_testing-Bodos_power_systems-Article-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d46271bf4f920171ee81ad6c4a1f
 - [14] 'Chip-Shortform2004.pmd.pdf'. Accessed: Jul. 23, 2021. [Online]. Available: <https://ixapps.ixys.com/DataSheet/25ee3e05-878c-4341-8c6c-4950b9e1490b.pdf>
 - [15] 'Low Temperature Co-Fired Ceramics - an overview | ScienceDirect Topics'. <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/low-temperature-co-fired-ceramics> (accessed Jul. 23, 2021).
 - [16] 'Alumina | chemical compound', *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/alumina> (accessed Jul. 23, 2021).