

Progresivní tlustovrstvé technologie v elektronických aplikacích

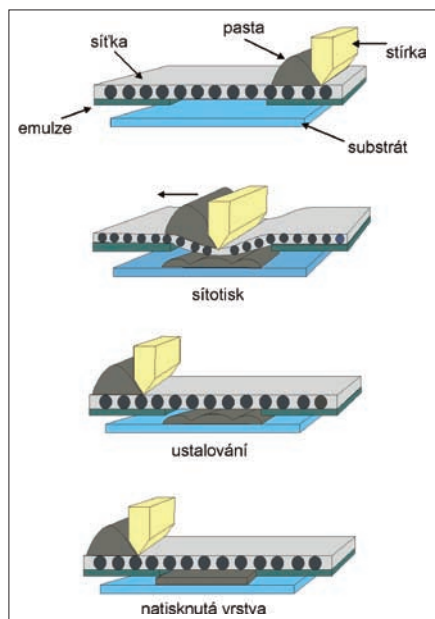
Ing. Magdaléna Bujaloboková, PhD., ETD Transformátory, a. s.,
Ing. Pavel Trnka, Ph.D., katedra technologií a měření ZČU FEL

Pro většinu elektronických aplikací je charakteristická úzká spojitost jednotlivých prvků se systémy. Spolehlivost, kvalita, funkčnost, možnost miniaturizace a mnoho dalších vlastností přímo závisejí na tom, jakou technologií jsou vyrobeny jednotlivé prvky systému. Tyto prvky jsou vyráběny rozličnými více či méně známými výrobními postupy. Způsob přípravy součástek nebo celých obvodů v konečné fázi podmiňuje výsledné elektrické, mechanické a jiné speciální vlastnosti elektronických obvodů. Z uvedeného hlediska je proto důležitou etapou v celém řetězci tvorby elektronických obvodů právě neustálé zlepšování a inovace technologií, jimiž se jednotlivé součástky vyrábějí. Cílem článku je poukázat na vybrané technologie, které jsou zahrnuty do skupiny tlustovrstvých technologií. Tyto technologie jsou poněkud atypické, zároveň však při zpracování poskytují široké možnosti rozvoje, a tím i zlepšení výkonů a následně i elektrických parametrů vytvořených obvodů.

1. Úvod

Počátek rozvoje tlustovrstvých technologií jako rovnocenné metody s ohledem na jiné technologie (např. fotolitografii) používané k tvorbě desek plošných spojů (PCB – *Printed Circuit Board*) se datuje od roku 1942, kdy byly vyvinuty tekuté organické pasty na

ků směřujících ke vzniku hybridních integrovaných obvodů (HIO – *Hybrid Integrated Circuits*) [1]. Předností této technologie, a zároveň její devízou, byla možnost kombinovat materiály a prvky, které dosud nebylo možné žádným způsobem sloučit. Tím byl umožněn prudký rozvoj tohoto oboru v dalších letech.

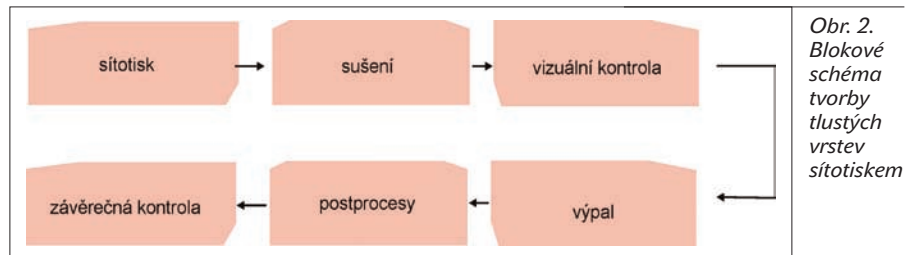


Obr. 1. Schematický náčrt síťotisku

bázi stříbra. Později, okolo roku 1950, bylo zjištěno, že tlustovrstvými technologiemi lze vytvářet také desky plošných spojů, tudíž je možné plně nahradit fotolitografické procesy spojené s jejich vytvářením. Šedesátá léta dvacátého století byla v tomto oboru charakteristická vznikem odporových past na bázi stříbra, uhlíku a oxidů mědi, jejich elektrické vlastnosti však byly nevyhovující. Zvrat nastal až vyvinutím odporových past na bázi paladia; tím se elektrické vlastnosti podstatně zlepšily. To byl jeden ze základních kro-

tem. Pasta se na substrát protlačuje stěrkou, která funguje jako flexibilní nůž. Schematický náčrt celé operace je na obr. 1 [2], [3]. V procesu síťotisku je třeba sledovat různé parametry a nastavení jednotlivých součástí síťotiskového zařízení (např. odskok sítky od základního substrátu, tzv. *snap-off*, tlak stěrky na sítku, viskozita pasty apod.). Důležitým parametrem, který značně omezuje použití této technologie, je poměrně malá rozlišovací schopnost; pohybuje se maximálně okolo 100 μm .

V procesu síťotisku se tedy k vytvoření motivu používají různé druhy past. Pasty jsou tiotropní kompozice, které se skládají ze čtyř složek: dočasného pojiva, permanentního pojiva, funkční složky a ředidla (neboli rozpouštědla). Druh pasty, včetně jejích výsledných elektrických vlastností, určuje právě obsah jednotlivých prvků (kovů, např. měď, stříbro,



Obr. 2. Blokové schéma tvorby tlustých vrstev síťotiskem

Zajímavou skutečností tlustovrstvé technologie je, že ačkoliv celý proces prošel dlouhým vývojem, je s malými obměnami identický jako na začátku vývoje v šedesátých letech dvacátého století. Zároveň s vývojem tlustovrstvé technologie se rozvíjela i tenkovrstvá technologie, která tlustovrstvou načas zastínila. V současné době se pozornost obrací zpět k tlustovrstvým technologiím, které inovacemi jednotlivých operací výrobního procesu a rozšířením materiálové báze poskytují široké možnosti je neustále zlepšovat a zdokonalovat. Pro ilustraci je zde uvedena klasická tlustovrstvá technologie, z níž se vychází při přípravě nových, modifikovaných technologií.

2. Klasická tlustovrstvá technologie

Samotný název napovídá, že z této technologie byly později odvozovány další, progresivnější modifikace. Principem této metody je, jednoduše řečeno, protlačení tlustovrstvé pasty volnými oky sítky s motivem na izolační podložku. Tím se vytvoří požadovaná vrstva ve stejném seskupení jako na sítkce s moti-

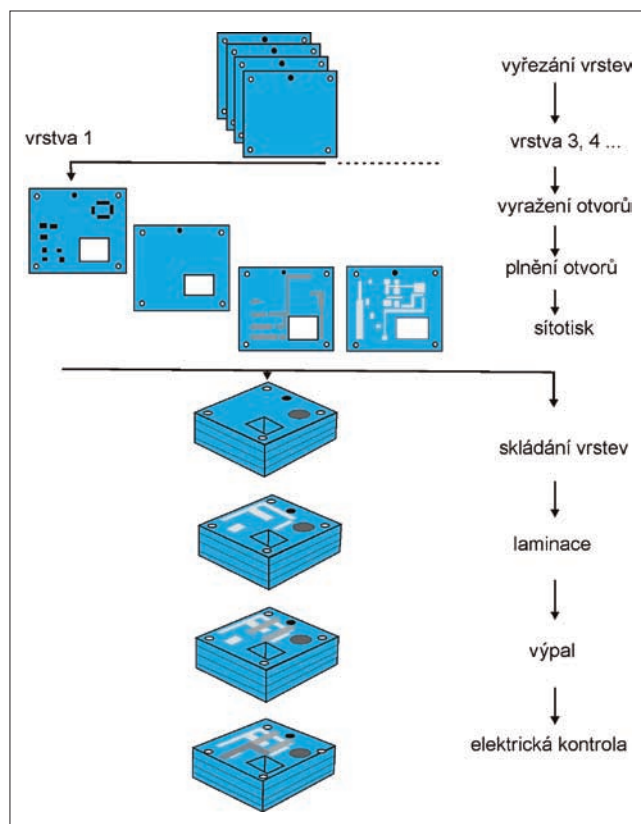
zlatu, platina apod.) ve funkční složce. Podle výsledných elektrických parametrů jde o pasty vodivé, odporové nebo dielektrické [4].

Vytvoření celého funkčního elektronického obvodu však samotným síťotiskem nekončí. V dalších krocích je zapotřebí natlačenou pastu „zasušit“ za konkrétních podmínek daných výrobcem. Procesem sušení se vyrovnávají nehomogenity na povrchu natlačené vrstvy. Konečné elektrické, mechanické, popř. jiné vlastnosti získává vrstva vytvořená na izolační podložce výpalem. Pro každou pastu, stejně jako pro izolační podložku, jsou přesně stanoveny teplotní profily výpalu. Technologický postup od natlačení pasty až po konečnou fázi testování funkčnosti elektrických vlastností vrstvy je znázorněn na obr. 2.

Důležitou podmínkou získání kompaktní natisknuté vrstvy je také správná volba materiálu izolační podložky. Vlastnosti keramického materiálu, jako je např. planarita, poréznost, drsnost povrchu keramiky atd., ovlivňují kvalitu natisknuté vrstvy. Jako nejběžnější materiály se používají např. 96% Al_2O_3 , AlN , BeO a LTCC (popsáno podrobněji v [5]). Přehled vlastností nejběžnějších

keramických materiálů je uveden v přehledové tabulce [6], [7].

Klasická tlustovrstvá technologie se tradičně používá k tvorbě hybridních integrovaných obvodů, dále k tvorbě tlustovrstvých



Obr. 3. Technologický postup zpracování keramiky LTCC

senzorů apod. Stále si díky své ekonomické efektivnosti a nenáročnosti udržuje pevnou pozici při použití v elektronice.

3. Technologie LTCC

Zcela novým přístupem v chápání tlustovrstvé technologie je její modifikace s využitím LTCC (*Low Temperature Co-fired Ceramic*, nízkoteplotně vypalovatelná keramika) jako izolační podložky. Zpracování této keramiky spočívá, podobně jako u klasických materiálů, v sítotisku past, sušení, výpalu a doplňkových konečných úpravách (obr. 3). Rozdílem je však možnost současně vytvářet několik vrstev; tím se podstatně redukuje doba potřebná na celý technologický proces. Uvedený způsob rovněž zvyšuje spolehlivost celé technologie. Paralelně vytvářet vrstvy klasická tlustovrstvá technologie neumožňuje. Zpracování zmíněné keramiky, tzv. technologie LTCC, je tedy chápáno jako vytváření vodivých, odporových nebo dielektrických vrstev sítotiskem na keramice LTCC, která obsahuje 40 % Al_2O_3 , 45 % SiO_2 a 15 % organické složky. Keramika LTCC se však vyznačuje specifickou vlastností – smršťováním v procesu výpalu, které se ve směru os x a y pohybuje v rozmezí $12,27 \pm 0,3$ % a ve smě-

ru osy z tato hodnota činí $15 \pm 0,3$ % [5]. Procento smrštění je důležité znát pro zahrnutí těchto údajů do návrhu vytváření celé požadované struktury. Navíc je třeba této vlastnosti přizpůsobit i pasty, které se v procesu výpalu musí smršťovat stejně jako keramika [8], [9].

Výjimečností technologie LTCC je možnost vytvářet vícevrstvé struktury, tzv. 3D struktury. V tom případě do procesu vstupuje doplňková operace – laminace. Jde o stlačení určitého počtu vrstev keramiky s natisnutým motivem (dvě vrstvy a více) naskládaných na sebe působením tlaku. Dosud se používala jednoosá laminace, častěji se však volí izostatická laminace, kterou se dosahuje rovnoměrné tloušťky struktury po stlačení.

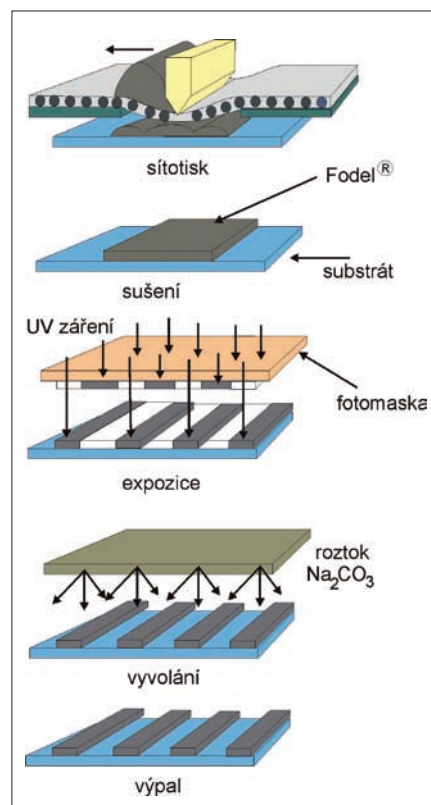
Technologie LTCC díky flexibilitě použitého materiálu v surovém stavu umožňuje také vytvářet netradiční struktury. Její potenciál se s úspěchem využívá při tvorbě modulů MCM-C (*Multi Chip Modules Ceramic*) pro vysokofrekvenční aplikace, což jsou v podstatě 3D struktury na bázi keramických materiálů. Dále tyto postupy nacházejí využití v senzorové technice, pro mikrovlnné aplikace (různé druhy RF filtrů), mobilní telekomunikace apod. Rozlišovací schopnost technologie LTCC je méně než 100 μm .

4. Technologie světlocitlivých vrstev

Technologii světlocitlivých vrstev je možné charakterizovat jako metodu odpovídající technologickým procesem spíše technologii LTCC, ovšem s určitými změnami. Tyto změny jsou způsobeny především složením past (např. Fodel[®] DuPont), které se nanáší jen na keramiku LTCC [10]. Modifika-

ce je výsledkem působení fotosenzitivního polymeru, představujícího organickou složku pasty. Proto je třeba po nanesení pasty sítotiskem ji nejen „zasušit“, ale před dalšími kroky – jako je laminace, výpal a další doplňkové úpravy – zasušenou vrstvu ještě podrobit expozici UV zářením a následně vyvolat exponovaný motiv v roztoku Na_2CO_3 [11]. Procesem výpalu se však fotocitlivé složky odstraní, proto mají tyto pasty (vodivé nebo dielektrické) stejné vlastnosti jako klasické tlustovrstvé pasty. Celý proces je názorně ukázán na obr. 4.

Předností uvedené technologie je zvýšení rozlišovací schopnosti na 25 μm . Světlocitlivé materiály se díky tomu, že vykazují nízký útlum signálu a nízký ztrátový činitel, ve velké šíři uplatňují v oblasti vysokofrekvenčních aplikací. Pro vynikající rozlišovací schopnost je možné také dosáhnout větší integrace součástek; proto se opět úspěšně využívají při tvorbě vícevrstevných modulů [12].



Obr. 4. Technologie zpracování Fodel[®] DuPont

Přehledová tabulka vybraných vlastností keramických materiálů

Vlastnost	Materiál			
	AlN	Al_2O_3	BeO	LTCC
tepelná vodivost λ (W/m·K)	140 až 170	10 až 35	150 až 250	2 až 4
činitel teplotní roztažnosti α při 100 °C ($10^{-6} \cdot K^{-1}$)	2,65	5,5	5,40	4,3
měrný elektrický odpor ρ ($\Omega \cdot cm$)	$4,0 \cdot 10^{11}$	$>10^{14}$	10^{13} až 10^{15}	10^{14}
elektrická pevnost E_p (kV·mm ⁻¹)	15	>10	10	8,5
relativní permitivita ϵ_r při 1 MHz	8,9	9,7	6,7	2,5 až 8,0
mechanická pevnost R_m (MPa)	450	400	240	190

5. Systémy KQ

Při zpracování systémů KQ (výrobce firma Heraeus) se kombinují tlustovrstvé procesy s fotolitografickými procesy. Rozlišovací schopnost této technologie je přibližně 25 μm [13], v mnoha případech při dodržení všech optimálních podmínek až 15 μm . Systémy KQ jsou vodivé nebo dielektrické pasty, podobné jako světlocitlivé. V tomto procesu je třeba po naneseení pasty (vodivé nebo dielektrické), zasušení a výpalu nanést foto-rezist, exponovat motiv maskou a motiv vyvolat. V konečné fázi je celý proces završen leptáním a opětovným výpalem nanese-né vrstvy. Jako izolační podložku lze použít nejen keramiku LTCC, ale i jiné druhy keramik, např. 96% Al_2O_3 , AlN nebo berylio-vo keramiku.

Systémy KQ jsou úspěšně využívány při tvorbě ultravysoké hustoty integrace přepojení ve vícevrstvých strukturách, a to především díky své vysoké vodivosti (u vodivých past), vysoké kvalitě vytvořených vrstev s hladkým povrchem apod. Uplatnění nacházejí také v optoelektronice, mikrovlnných aplikacích, telekomunikacích, biomedicině apod.

6. Závěr

V článku jsou prezentovány různé progresivní a jedna klasická tlustovrstvá technologie. Tyto technologie jsou stále používány při vytváření různých elektronických obvodů. Sledováním rychlého vývoje v této oblasti a na základě současných poznatků lze předpokládat jejich další rychlý rozvoj tak, jak budou zaváděny nové výrobní operace a postupy. Tyto postupy umožní dosáhnout větší rozlišovací schopnosti, vyšší kvality a větší ekonomické efektivity vytvářených elektronických obvodů nebo samotných součástek.

Literatura:

- [1] WHITE, N. M.: *Thick Film Sensor*. Elsevier Science B. V., 1994.
- [2] HARPER, A. Ch.: *Handbook of Thick Film Hybrid Microelectronics*. The Kingsport Press, London, 1974.
- [3] GOLONKA, L. J.: *New application of LTCC technology*. In: Proc. 28th International Spring Seminar on Electronic Technology, Wiener Neustadt (Austria), 2005, p. 148–152.
- [4] GARROU, P. E. – TURLIK, I.: *Multichip Module technology handbook*. McGraw-Hill, New York, 1998.

Most of the electrical applications has characteristic close relationship of structure components, whole system and reliability. Reliability, quality, functionality, miniaturization and other features depend directly on the used technology of the system components. System components are produced using more or less known technologies. Their manufacturing process has impact on the final electrical, mechanical and other special properties of the electrical circuits. From this point of view improving the technology is very important step in the design of reliability of electrical circuits. The main aim of the paper is to show description of some thick-film technologies. These technologies are still atypical but offer various possibilities of the development. Development in the thick-film technologies continues by improving of the reliability, electrical parameters and miniaturization.



Ing. Magdaléna Bujaloboková, Ph.D.

Vystudovala Technickou univerzitu v Košicích. V roce 2002 získala titul Ing. v oboru materiálové inženýrství na katedře hybridní mikroelektroniky Fakulty elektrotechniky a informatiky TU v Košicích. Od roku 2005 pracovala jako výzkumný pracovník na katedře technologií v elektronice FEI TU v Košicích. V roce 2006 obhájila disertační práci na téma návrh metodiky hodnocení spolehlivosti tlustovrstvých cívek a obdržela titul Ph.D. v oboru elektrotechnologie a materiály. V současné době pracuje v ETD Transformátory, a. s., Plzeň. Oblasti jejího zájmu jsou tlustovrstvé technologie, tlustovrstvé senzory a především keramika LTCC, on-line diagnostika výkonových transformátorů, částečné výboje.



Ing. Pavel Trnka, Ph.D.

Vystudoval Fakultu elektrotechnickou Západočeské univerzity v Plzni v oboru průmyslová elektronika. V roce 2005 získal titul Ph.D. na ZČU FEL v Plzni. Od roku 2005 byl zaměstnancem katedry technologií a měření ZČU FEL v Plzni. V letech 2002 až 2003 byl studentem na University of Applied Science, Fachhochschule, Regensburg (Německo), a šest měsíců působil v oddělení výzkumu v Maschinenfabrik Reinhausen (Německo). V roce 2006 pracoval jako postgraduální spolupracovník vysokonapěťové laboratoře (Postdoctoral Associate, High Voltage Laboratory of ECE, Mississippi State University) v Mississippi (USA). V současné době působí na Elektrotechnické fakultě ZČU v Plzni a je spoluřešitelem výzkumného záměru Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy ČR MSM 4977751310, jehož hlavním řešitelem je prof. Ing. Václav Mentlík, CSc. Jeho oblasti zájmu jsou degradační procesy v izolačních systémech, modelování životnosti, částečné výboje a vysokonapěťové izolační systémy. Je členem několika mezinárodních vědeckých organizací a řešitelem projektu POSTDOC-07 MŠMT.

- [5] TRNKA, P. – BUJALOBOKOVÁ, M.: *Progresivní keramika v elektronických aplikacích*. Advances in EE, (in review), 2008, vol. 1.
- [6] DABROWSKI, P. – GOLONKA, L. J. – LICZNERSKI, B. W. – TETERYCZ, H.: *Application of laser in thick-film sensor technology*. In: Proc. 19th International Spring Seminar on Electronic Technology, Göd (Hungary), 1996, p. 187–191.
- [7] PERNID, M. A. – PRIETO, J. M. – LOPE-RA, M.: *High Power Density DC/DC Converter Using Thick-Film Hybrid Technology*. In: PowerPulse, Darnell Group Inc.
- [8] Preliminary Data Sheet, DuPont 851-AT, DuPont 951-AT.
- [9] GOLONKA, L. J. – MARKOWSKI, A. – RO-GUSZCZAK, H. – ZAWADA, T. – NEEDES, C. R. – BARKER, M. F. – OLLIVIER, P. T. et al.: *Constrained-sintered, Low Temperature Co-fired Ceramic for IC packaging applications*. In: Proc. 53rd Electronic Company & Technology Conference IEEE, New Orleans, 2003, p. 30–35.
- [10] DZURDZIA, B. – MAGONSKI, Z. – NOWAK, S. et al.: *Photoimageable Thick-Films In Microwaves – An Approach to Multilayer Circuits*. In: Advancing Microelectronics, July-August 2004, p. 28–32.
- [11] DuPont Photopolymer & Electronic Materials: 6158 Ag Co-fire Inner Conductor.
- [12] BROWN, R.: *Materials and Processes for Microwave Hybrids*. International Society for Hybrid Microelectronics, USA, 1990.