

UŽITNÝ VZOR

(11) Číslo dokumentu:

38 295

(13) Druh dokumentu: **U1**

(51) Int. Cl.:

G01R 33/00 (2006.01)
G01R 33/02 (2006.01)
G01R 33/341 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2024-42234**
(22) Přihlášeno: **17.09.2024**
(47) Zapsáno: **10.12.2024**

(73) Majitel:
Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, Jižní
Předměstí, CZ
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., Praha 8,
Libeň, CZ
ELCERAM a.s., Hradec Králové, CZ

(72) Původce:
Ing. Pavel Turjanica, Ph.D., Plánice, CZ
doc. Ing. Jan Řeboun, Ph.D., Rokycany, Plzeňské
Předměstí, CZ
Ing. Ivan Ďuran, Ph.D., Drahelčice, CZ
doc. Ing. Slavomír Entler, Ph.D., Chrást'any, CZ
Mgr. Marek Šimonovský, Hradec Králové, Třebeš,
CZ
Ing. Lukáš Štěpán, Černožice, CZ
Ing. Jan Johan, Roudnice, CZ

(74) Zástupce:
artpatent, advokátní kancelář s.r.o., Dukelských
hrdinů 976/12, 170 00 Praha 7, Holešovice

(54) Název užitého vzoru:
Senzor pro měření magnetického pole

Senzor pro měření magnetického pole

Oblast techniky

5

Technické řešení se týká senzoru pro měření magnetického pole v extrémních podmínkách, zejména při vysoké okolní teplotě a při silné radiaci ionizujícího záření.

Dosavadní stav techniky

10

Obecně je senzor definován jako zařízení, které měří určitou fyzikální nebo technickou veličinu a převádí ji na signál, který lze dálkově přenášet a zpracovat v měřicích a řídicích systémech. Nejčastěji jde o elektrický signál, tj. časový průběh elektrického napětí nebo elektrického proudu.

15

Senzor pro měření magnetického pole slouží k měření intenzity magnetického pole, které senzorem prochází, přičemž působením proměnlivého magnetického pole se indukuje v senzoru elektrické napětí, které je z elektrických kontaktů senzoru odvedeno elektrickými vodiči k vyhodnocení. Elektrická indukce probíhá v elektrickém vodiči, jenž je v senzoru navinut do cívky.

20

Je známou skutečností, že přesnost měření, nebo schopnost měřit, ovlivňují podmínky panující v průběhu měření senzorem. Extrémními podmínkami mohou být vysoké teploty a intenzivní radiace ionizujícího záření (gama záření, neutronové záření atp.), např. u termojaderných energetických reaktorů, ve kterých na senzory magnetického pole působí provozní teploty až okolo 500 °C a celkové neutronové dávky až okolo 10^{25} n/m².

25

V současné době neexistují přesné senzory pro měření magnetického pole v extrémních podmínkách, tj. při teplotě okolo 500 °C a při celkové neutronové dávce okolo 10^{25} n/m², a odolné vůči dalším radiačním a termoelektrickým efektům.

30

Známé nekeramické senzory pro měření magnetického pole s ochrannou izolací vinutí z elektrického vodiče jsou funkční při relativně nízkých teplotách oproti skutečnému stavu panujícímu u termojaderných energetických reaktorů. Nejvyšší provozní teplotu cca do 250 °C dovolují polyimidiové izolace (např. kapton) elektrických vodičů vinutí.

35

Vyšší provozní teplotu zvládají senzory pro měření magnetického pole s elektrickým vodičem bez izolace vinutým na keramické nosiče, nebo senzory z masivních minerálně izolovaných kabelů, tzv. „MIC“. Konkrétně se jedná o jádrový elektrický vodič, který je umístěn v ocelovém plášti a kvůli elektrické izolaci je obsypán keramickým práškem, zpravidla na bázi MgO nebo Al₂O₃.

40

Nevýhody těchto senzorů pro měření magnetického pole při vysokých provozních teplotách spočívají v tom, že umožňují efektivně realizovat obvykle jen jednu vrstvu závitů. MIC senzory jsou výrazně masivní. Obojí výše uvedené vede k omezení počtu závitů v senzoru, a tím k výsledné nízké citlivosti cívek z elektrických vodičů na pomalé změny magnetického pole. I v případě více vrstev závitů má stále cívka díky své délce vinutí nezanedbatelnou citlivost na změny pole v bočních osách, což vzhledem k poměru sil magnetických polí může dokonce převýšit vlastní snímáný signál.

45

Z výše uvedených důvodů byla v minulých letech vyvinuta technologie keramických cívek, tzv. „LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic)“, které dosahují vyšší citlivosti na pomalé změny magnetického pole a minimalizují citlivost v ostatních osách vinutí. Avšak vývoj LTCC cívek narazil na technologické problémy vedoucí k tomu, že pro materiál cívek musí být použito stříbro, nebo zlato, přičemž ani jeden z materiálů není zcela vhodný do prostředí s ionizujícím zářením. Pod vlivem neutronového záření se stříbro silně aktivuje, což je nežádoucí zejména z hlediska následné manipulace či likvidace. Stříbro má rovněž velmi vysokou hodnotu zachytu

55

neutronů, oproti Cu a ostatním kovům, takže senzory na bázi LTCC technologie mají mnohem vyšší citlivost na teplotní gradient. Při použití zlata pro vodivé vrstvy v LTCC dále vzniká riziko tzv. transmutace, při které dochází ke změně jeho fyzikálně-chemických vlastností a v senzoru tak vznikají lokální termoelektrické články, zkreslující výstupní signál. Rovněž je známý nedostatek, že díky nestabilní struktuře mají na technologii LTCC postavené senzory pro měření magnetického pole omezenou provozní teplotu na 250 °C.

Dalším problémem jsou elektrické jevy a změny vlastností senzorů způsobené radiací. Jedná se o efekty RIC, RIED, RIEMF, RITES, TIEMF. Tyto odborné zkrácené názvy efektů jsou vysvětleny níže v textu.

Neutronové a gama záření vyvolá v materiálu senzoru silný ionizační efekt, tj. uvolnění volných energetických elektronů. Volné elektrony mohou vznikat v důsledku přímé interakce gama s izolantem buď Comptonovým, fotoelektrickým nebo párotvorným efektem. Promptní elektrony jsou také nepřímo generovány neutrony prostřednictvím zářivého zachytu neutronů, které emitují energetické záření gama. Zpožděné elektrony mohou být generovány po radioaktivním rozpadu beta nestabilního izotopu vzniklého zachytem neutronu. Tyto procesy generují zdroj proudu, který může ovlivnit elektrické chování senzoru prostřednictvím různých radiačních efektů.

Radiační efekt RIC (radiací indukovaná vodivost) odpovídá snížení izolační funkce substrátu. RIC je úměrný rychlosti ionizace a zaniká po zastavení toku záření. Může způsobit únik signálu a rušení.

Radiační efekt RIED (radiation induced electrical degradation) způsobuje, že substrát postupně ztrácí izolační schopnost pod vlivem ozařovacího toku, zejména při vysoké teplotě a přiloženém napětí. Nakonec, když je dosaženo určité prahové dávky, může substrát zcela ztratit svůj izolační charakter.

Radiační efekt RIEMF (radiací indukovaná elektromotorická síla) vytváří přes izolant zdroj proudu mezi vodičem snímače a uzemněnou konstrukcí, což může vést k rozvoji napětí nebo nárůstu náboje na snímači. To způsobuje nižší stabilitu všech měřených slabých signálů.

Radiační efekt RITES (radiací indukovaná termoelektrická citlivost) postupně mění Seebeckův nebo termoelektrický koeficient v důsledku nerovnoměrné transmutace vodiče vyvolané neutrony (buď z důvodu nerovnoměrného rozložení nečistot a/nebo neutronového pole).

Teplotní efekt TIEMF (teplotou indukovaná elektromotorická síla) způsobuje napětí vyvinuté v důsledku těchto změn termoelektrického efektu, pokud napříč senzorem existuje teplotní gradient.

Radiační a teplotně indukované elektrické účinky mají za následek vznik falešných napětí na svorkách snímače, která, ačkoli se pohybují v řádu několika μV , mohou ovlivnit přesnost konečného měření.

V neposlední řadě je nezbytné vyřešit tzv. swelling, neboli bobtnání Al_2O_3 způsobené tokem neutronového záření. Ve vysokých dávkách (nad 10^{23} n/m^2) vede radiace ke změně fyzických rozměrů substrátu a k potrhání vodivých motivů senzoru.

Úkolem technického řešení je vytvoření senzoru pro měření magnetického pole, který by spolehlivě fungoval v extrémních podmínkách vysokých provozních teplot do nejméně 500 °C a intenzivní radiace ionizujícího záření (při celkové neutronové dávce nejméně do 10^{23} n/m^2), který by neměl masivní konstrukci jako mají známé senzory založené na technologii MIC, který by měl vysokou citlivost ve snímací ose a maximální úroveň potlačení signálu v ostatních osách, kompenzoval v maximální možné míře efekty RIC, RIED, RIEMF, RIEMF, RITES, TIEMF, netrpěl bobtnáním a který by měl jednoduchou konstrukci umožňující snadnou a masovou výrobu.

Podstata technického řešení

5 Vytčený úkol je vyřešen pomocí senzoru pro měření magnetického pole vytvořeného podle níže uvedeného technického řešení.

10 Senzor pro měření magnetického pole tvoří nejméně jeden vinutý elektrický vodič pro indukci elektrického napětí penetrujícím proměnlivým magnetickým polem. Dále senzor tvoří izolace uspořádaná mezi závity vinutého elektrického vodiče pro zamezení vzájemnému styku závitů. Za další tvoří senzor elektrické kontakty uspořádané na koncích vinutého elektrického vodiče pro připojení externího zařízení k senzoru pro měření magnetického pole.

15 Podstata technického řešení spočívá v tom, že vyvinutý senzor pro měření magnetického pole zahrnuje nejméně dva substráty z keramického izolačního materiálu uspořádané do sendvičové struktury. Sendvičová struktura umožňuje modulární skládání při výrobě vyvinutého senzoru, takže vhodnou volbou počtu substrátů se poskytne dostatek místa pro vinutý elektrický vodič.

20 Dále podstata technického řešení spočívá v tom, že je vinutý elektrický vodič tvořen alespoň jedním plošným motivem uspořádaným k alespoň jedné ze stran substrátů. To je významné proto, že je možné plošné motivy skládat nad sebe, čímž se navyšuje citlivost vyvinutého senzoru na pomalé změny magnetického pole. Navýšení citlivosti má na svědomí nejenom větší počet plošných motivů, ale i jejich rozmístění v prostoru a tvar vinutí, tj. závisí na jednotlivých patrech sendvičové struktury.

25 Za další podstata technického řešení spočívá v tom, že substráty mají pokovené otvory pro elektrické propojení jejich rubové a lícové strany, přičemž jsou elektrické kontakty uspořádané zvnějška sendvičové struktury. Pokovené otvory umožňují elektrické propojení jednotlivých vrstev (substrátů) v sendvičové struktuře, a to až k elektrickým kontaktům.

30 Posledním nepostradatelným technickým znakem vyvinutého senzoru je to, že keramický izolační materiál substrátů je ze skupiny Al_2O_3 , nebo AlN , nebo MgAl_2O_4 , a plošný motiv je z materiálu ze skupiny Cu, Pt, W.

35 Tyto materiály dokáží odolávat vysokým provozním teplotám, velkým dávkám neutronového ionizujícího záření a jsou tzv. vakuově kompatibilní, přičemž se při extrémní zátěži chovají podobně, takže nedochází k poškození vlivem například odlišné objemové roztažnosti. Keramické materiály jsou dostatečně pevné, aby vytvořily pevnou a stabilní oporu plošným motivům, přičemž měď dobře vede indukovaný elektrický proud a neochotně transmutuje při bombardování neutrony z ionizujícího záření. Vyvinutý senzor je schopný trvale pracovat při teplotě minimálně 500 °C
40 v atmosféře bez přítomnosti kyslíku a ve vakuu nedochází k uvolňování plynu z uzavřených struktur materiálu

45 Ve výhodném provedení vyvinutého senzoru jsou sousedící plošné motivy v zákrytu maximálně z 20 %. To přináší tu výhodu, že se omezuje mezizávitová kapacita cívek, která by měla negativní vliv na signál měření.

50 V dalším výhodném provedení vyvinutého senzoru je mezi sousedícími substráty vytvořen alespoň jeden fixační bod nacházející se mimo plošné motivy, který je z materiálu plošného motivu. Fixační bod pevně drží sousedící substráty vůči sobě, přičemž použitím stejného materiálu dojde k tomu, že v extrémních podmínkách tento materiál reaguje jako zbytek plošných motivů, čímž se omezuje riziko poškození senzoru vlivem lokálních pnutí. Tím, že jsou fixační body mimo plošné motivy, tak zásadně neovlivňují procesy odehrávající se na vinutích tvořených plošnými motivy. Tím, že jde o malé plošné body a nikoli větší struktury, nedochází k tvorbě bludných proudů nebo lokálních závitů nakrátko.

55

V alternativním výhodném provedení vyvinutého senzoru je fixační bod zahrnut do sousedících plošných motivů, aby je elektricky propojil.

V dalším výhodném provedení vyvinutého senzoru zahrnuje sendvičová struktura nejméně jeden doplňkový substrát bez plošného motivu, přičemž je doplňkový substrát v sendvičové struktuře uspořádán na jejím začátku, a/nebo na jejím konci, a/nebo uvnitř. Krajní doplňkové substráty mají funkci ochrany před mechanickým poškozením plošných vodivých motivů. Vnitřní doplňkový substrát je použit dle požadavku konkrétních návrhů výsledného 3D tvaru cívky poskládané z plošných motivů rozmístěných v sendvičové struktuře podle okolností použití vyvinutého senzoru, nebo změně elektrických vlastností senzoru (např. mezizávitová kapacita).

Je výhodné, pokud je doplňkový substrát uspořádaný na začátku a/nebo na konci sendvičové struktury na straně odvrácené od sendvičové struktury opatřen polem bodů, nebo hřebenovou strukturou, z elektricky vodivého materiálu. Pole bodů, či hřebenová struktura, kompenzují vlivy elektronové migrace mezi vrstvami způsobené ionizujícím zářením. Krajní plošné motivy jsou z jedné strany bez souseda, ze kterého by přicházely ionizujícím zářením vyražené elektrony, čímž dojde k lokální nerovnováze v části vinutí, která se projeví generováním lokálního elektrického napětí. Zároveň tato nerovnováha vytváří zdroj proudu mezi vodičem snímače a uzemněnou konstrukcí (RIEMF). Pokud s krajními plošnými motivy sousedí pole bodů, nebo hřebenová struktura, chová se to stejně, jako by v sousedství byl další plošný motiv, přičemž vygenerovaný elektrický proud elektronové migrace mezi závitů a polem bodů zůstane v rovnováze, nerovnováha je přenesena na pole bodů či hřebenovou strukturu mimo senzor.

Aby byla nastolena rovnováha v případě elektronové migrace, je výhodné, pokud se celkový objem materiálu tvořícího pole bodů, nebo hřebenovou strukturu, rovná objemu materiálu sousedícího plošného motivu s tolerancí nejvýše $\pm 20\%$.

V dalším výhodném provedení vyvinutého senzoru jsou plošné motivy, které jsou seřazené v řadě za sebou od lícové strany sendvičové struktury k rubové straně sendvičové struktury, propojené do jediné smyčky. Současně platí skutečnost, že kombinovaný průmět plošných motivů ve směru kolmém k snímací ose senzoru tvoří magneticky aktivní souvislou plochu nejvýše z 50 % z celkové plochy průmětu plošných motivů. Díky této skutečnosti vzniká hřebenový motiv magneticky aktivní plochy, jehož podstata je ilustrována na obr. 13a. To přináší tu výhodu, že je senzor méně citlivý na magnetické pole v nežádoucím směru trojrozměrného prostoru oproti neoptimalizovanému vinutí senzorů, nebo běžnému drátovému vinutí na kostře cívky (obr. 13b).

V dalším výhodném provedení vyvinutého senzoru jsou plošné motivy, které jsou seřazené v řadě za sebou od lícové strany sendvičové struktury k rubové straně sendvičové struktury, propojené do jediné smyčky, ve které jsou nejprve propojené plošné motivy na lichých pozicích sendvičové struktury, na poslední pozici dochází k přechodu na motiv na sudé pozici sendvičové struktury, a poté jsou propojené po sudých pozicích zpět. Pokud je počet vrstev plošných motivů sudý, dochází k pravidelnému střídání kombinovaných průmětů plošných motivů ve směru kolmém k snímací ose senzoru s kladným přírůstkem signálu od nežádoucího magnetického pole a záporným přírůstkem signálu od nežádoucího magnetického pole, které se v ideálním případě vyruší. Dochází k tzv. twistování vrstev a díky němu k dalšímu snížení efektivní plochy kombinovaného průmětu plošných motivů na úroveň $<5\%$ z celkové plochy průmětu plošných motivů v dané vedlejší ose, viz obr. 16. V případě, že je počet plošných motivů lichý, není vzájemná kompenzace kladných a záporných přírůstků tak efektivní, nicméně stále je značná část nežádoucího signálu kompenzována.

V dalším výhodném provedení vyvinutého senzoru jsou plošné motivy, které jsou seřazené v řadě za sebou od lícové strany sendvičové struktury k rubové straně sendvičové struktury, propojené do jediné smyčky, ve které jsou plošné motivy na pozicích v první polovině pořadí propojené s plošnými motivy nacházejícími se opačných pozicích druhé poloviny pořadí. Pokud je počet vrstev plošných motivů sudý, je propojen první plošný motiv s posledním plošným motivem, poté

se smyčka vrací a pokračuje na druhý plošný motiv v pořadí, který se propojuje s předposledním plošným motivem atd., dokud se ve smyčce propojení nenachází všechny plošné motivy. V případě, že je počet plošných motivů lichý, tak vinutí v pořadí prvního plošného motivu je propojeno s elektrickým kontaktem (začíná) ve střední části senzoru, nikoli na jeho kraji. To je výhodné proto, že působení teplotních gradientů Δt_x , Δt_y , Δt_z má (díky vzniku lokálních nečistot transmutacemi) vliv na tvorbu lokálních termoelektrických napětí (TIEMF) podél úseků vinutí v jednotlivých plošných motivech. Díky faktu, že gradient teplot a množství transmutovaného materiálu jsou v různých místech senzoru různé, vznikají různé termoelektrické články. Lze předpokládat, že v blízkých vrstvách budou transmutace i teplotní gradienty podobnější, ve vzdálenějších rozdílnější. Cílené střídání/promíchání pořadí vrstev vzdálenějších a bližších zvyšuje pravděpodobnost vzájemného odečtení jednotlivých lokálních termočlánků ve výsledném signálu, pokud by v senzoru lokálně existovala oblast s vyšším výskytem TIEMF. Zároveň nesmí dojít k vytvoření nežádoucích smyček zvyšujících plochu kombinovaného průmětu plošných motivů. To nejlépe splňuje kývavé střídání dvojic vrstev senzoru viz obr. 17.

Mezi hlavní výhody technického řešení patří skutečnost, že jednotlivé substráty s plošnými motivy (materiál Cu, Pt, nebo W) jsou vrstveny na sebe, aby byl vytvořen 3D senzor s vyšším počtem závitů, než je možné realizovat na jednom substrátu. Elektrické a mechanické spojení jednotlivých substrátů je realizováno pomocí pasty tištěné a vypalované stejným způsobem jako při vytváření plošných motivů senzoru na substrátech, tj. nejprve jsou natištěny a vypáleny jednotlivé substráty s plošnými motivy, následně je opět aplikována pasta (Cu, nebo Pt, nebo W), přičemž jsou jednotlivé substráty navrstveny v sesazovacím přípravku na sebe do sendvičové struktury a následně jsou vypáleny v peci za stejných podmínek jako jednotlivé substráty. Na rozdíl od technologie LTCC vznikají mezi vrstvami substrátu drobné mezery. To má benefit jednak s ohledem na minimalizaci tzv. „uzavřeného plynu“ v senzoru (nepřípustné pro fúzní reaktory) a zároveň omezení efektu RIED.

Dále mezi výhody technického řešení patří skutečnost, že 3D struktura senzoru umožňuje střídáním sousedících plošných motivů, aby se nezakrývaly, dosažení nízké hodnoty mezizávitové kapacity, a tedy vysoké vlastní rezonanční frekvence současně za zvýšení rovnoměrnosti toku zkratových β -elektronů mezi jednotlivými závitů.

Dále mezi výhody technického řešení patří skutečnost, že plošné motivy v jednotlivých vrstvách sendvičové struktury jsou propojeny tak, aby vzniklý senzor vykazoval významnou aktivní plochu pouze v jedné ose. Ve zbývajících dvou osách je díky 3D struktuře propojení jednotlivých vrstev senzoru minimalizována její aktivní plocha (tzv. twistované střídání vrstev).

Senzor tedy s vysokou citlivostí detekuje magnetické pole v jedné ze tří os a v ostatních je významně potlačen oproti běžnému provedení vinutí.

Dále mezi výhody technického řešení patří skutečnost, že pořadí vrstev senzoru v sendvičové struktuře je při propojování úseků plošných motivů zároveň voleno s ohledem na kompenzaci termoelektrických jevů formou tzv. „nuofilárního skládání pořadí jejich zapojení“ s cílem minimalizace tzv. RITES a tzv. TIEMF efektů. Tzn., že plošné motivy nejsou propojovány postupně dle pořadí v sendvičové struktuře (od prvního v pořadí k poslednímu v pořadí), ale napřeskáčku, aby se jednotlivé úseky smyčky (plošné motivy na různých pozicích pořadí v sendvičové struktuře) navzájem kompenzovaly.

Dále mezi výhody technického řešení patří skutečnost, že je senzor na své rubové a lícové straně sendvičové struktury s doplňkovými substráty vybaven kompenzační vrstvou, která minimalizuje účinky tzv. RIEMF – Radiation Induced Electromotive Force a tzv. RIC – Radiation Induced Conductivity. Krycí doplňkový substrát neobsahuje vodivý plošný motiv senzoru, ale obsahuje motiv uspořádaného pole bodů, nebo motiv hřebenové struktury, a je navržen tak, aby kompenzoval tok beta-elektronů způsobených neutrony ve vodivých plošných motivech závitů

senzoru ve vnitřních vrstvách sendvičové struktury. Doplnkový substrát slouží rovněž k mechanické ochraně vodivých plošných motivů senzoru.

5 Objasnění výkresů

Uvedené technické řešení bude blíže objasněno na následujících vyobrazeních, kde:

- | | | |
|----|----------|---|
| 10 | obr. 1a | znázorňuje tři samostatné substráty s různými variantami plošného motivu, |
| | obr. 1b | znázorňuje skládání substrátu nad sebe do sendvičové struktury, |
| | obr. 2a | znázorňuje vyvinutý senzor v pohledu shora, |
| | obr. 2b | znázorňuje vyvinutý senzor v pohledu z boku, |
| | obr. 2c | znázorňuje vyvinutý senzor v axonometrickém pohledu, |
| 15 | obr. 3a | je rentgenový snímek zkompletované cívky vyvinutého senzoru v horním axonometrickém pohledu, |
| | obr. 3b | je rentgenový snímek zkompletované cívky vyvinutého senzoru v bočním axonometrickém pohledu, |
| | obr. 3c | je rentgenový snímek zkompletované cívky vyvinutého senzoru v čelním pohledu, |
| 20 | obr. 4 | znázorňuje v půdorysném transparentním pohledu první dvě vrstvy sendvičové struktury vyvinutého senzoru, pro jednoduchost je zobrazen pouze 1 závit, |
| | obr. 5 | znázorňuje schematicky technologické provedení vyvinutého senzoru v bočním řezu s plošnými motivy lokalizovanými jen na lícové straně substrátů a s fixačními body u pokovených otvorů a mimo plošné motivy, |
| 25 | obr. 6 | znázorňuje schematicky technologické provedení vyvinutého senzoru z obr. 5 s rozdílem, že jsou vyobrazeny kontaktní plochy u fixačních bodů, |
| | obr. 7 | znázorňuje schematicky technologické provedení vyvinutého senzoru z obr. 5 s rozdílem, že jsou fixační body v celé ploše substrátu, |
| | obr. 8 | znázorňuje schematicky technologické provedení vyvinutého senzoru v bočním řezu s plošnými motivy lokalizovanými současně na lícové a rubové straně substrátů, |
| 30 | obr. 9 | znázorňuje schematicky technologické provedení vyvinutého senzoru v bočním řezu s horním doplňkovým substrátem, |
| | obr. 10 | znázorňuje schematicky technologické provedení vyvinutého senzoru v bočním řezu s horním a spodním doplňkovým substrátem, |
| 35 | obr. 11 | znázorňuje v půdorysném transparentním pohledu první dvě vrstvy sendvičové struktury vyvinutého senzoru a dále pole bodů pro kompenzaci toku β -elektronů vyražených neutronovým tokem, |
| | obr. 12 | znázorňuje schematicky technologické provedení vyvinutého senzoru z obr. 11 v bočním řezu, |
| 40 | obr. 13a | znázorňuje schéma příkladného propojení plošných motivů do výsledné smyčky – cívky v senzoru z obr. 11 a 12, a současně zobrazuje kombinovaný průmět plošných motivů ve směru kolmém k snímací ose senzoru, |
| | obr. 13b | zobrazuje kombinovaný průmět vinuté cívky ve směru kolmém k snímací ose senzoru, |
| 45 | obr. 14 | znázorňuje v půdorysném transparentním pohledu schematicky první dvě vrstvy sendvičové struktury vyvinutého senzoru a dále hřebenové struktury pro kompenzaci toku β -elektronů vyražených neutronovým tokem a pro odvádění generovaného elektrického náboje, |
| | obr. 15 | znázorňuje schematicky vyvinutý senzor z obr. 14 v bočním řezu, |
| 50 | obr. 16 | znázorňuje schematicky příkladné provedení tzv. twistovaného propojení plošných motivů senzoru pro minimalizaci citlivosti signálu z nežádoucích směrů, |
| | obr. 17 | znázorňuje schematicky příkladné provedení skládaného střídání propojení plošných motivů senzoru pro minimalizaci vlivu radiačně indukovaných termoelektrických jevů, |
| 55 | obr. 18 | znázorňuje schéma vyvinutého senzoru kombinující twistování a specifické střídání vrstev senzoru i vrstev pro kompenzaci toku β -elektronů (nuofilární vinutí). |

Příklad uskutečnění technického řešení

Rozumí se, že dále popsané a zobrazené konkrétní případy uskutečnění technického řešení jsou představovány pro ilustraci, nikoliv jako omezení technického řešení na uvedené příklady.

5 Odborníci znalí stavu techniky najdou nebo budou schopni zajistit za použití rutinního experimentování větší či menší počet ekvivalentů ke specifickým uskutečněním technického řešení, která jsou zde popsána.

10 Na obr. 1a jsou znázorněny tři substráty 1 opatřené třemi odlišnými plošnými motivy 2 ve variantách A, B a C. Na obr. 1b je ilustrováno, jak se jednotlivé substráty 1 kladou nad sebe do sendvičové struktury o osmi vrstvách.

15 Na obr. 2a až 2c je znázorněn v různých pohledech vyvinutý senzor mající sendvičovou strukturu z několika substrátů 1. Sendvičovou strukturou prochází dvojice montážních otvorů. Jedná se o nepovinný technický znak, který nemá vliv na funkci a odolnost vyvinutého senzoru. Dále je viditelná vrchní krycí vrstva s natištěnými body, o které bude více rozepsáno dále v textu v souvislosti s obr. 11.

20 Na obr. 3a až 3c je znázorněn rentgenový snímek vyvinutého senzoru, na kterém jsou ze sendvičové struktury viditelné pouze plošné motivy 2. Z obrázků je patrné, že plošné motivy 2 jsou v sendvičové struktuře propojené do jediného vinutého elektrického vodiče – cívky, a že se nedotýkají.

Příklad 1

25 Vyvinutý senzor je složený z n-počtu keramických substrátů 1 z materiálu ze skupiny Al_2O_3 , AlN , resp. MgAl_2O_4 s elektricky vodivými plošnými motivy 2 uspořádanými na lícové straně substrátu a propojených vodivou pastou v předurčeném místě, tedy ve fixačním bodě 5 zasahujícím do plošných motivů 2 a 3. Senzor dle příkladu 1 je určen pro měření nestacionárního magnetického pole a je schopen trvale pracovat při teplotě minimálně 500 °C. V senzoru jsou přítomny pouze materiály, které nejsou snadno aktivovány neutronovým tokem (tzn., že nejsou použity materiály jako např. Ag, Ni, Co, atd.) a jsou kompatibilní s vakuem. Keramický substrát i vodivé plošné motivy senzoru jsou z materiálů, které jsou odolné vůči neutronovému toku minimálně do hodnoty 10^{23} n/m^2 .

35 Na lícové straně prvního substrátu 1 je umístěn plošný motiv 2, který má 1-m závitů. Na lícové straně druhého substrátu 1 je umístěn další plošný motiv 3 s 1-m závity, navazující na konec motivu 2 předchozí vrstvy sendvičové struktury a tvořící závity ve stejném směru jako první motiv 2. Na lícové straně třetího substrátu 1 je umístěn plošný motiv, který má 1-m závitů a má obdobnou topologii jako senzor na první vrstvě. Na lícové straně čtvrtého substrátu 1 je umístěn plošný motiv 3, který má 1-m závitů a má obdobnou topologii jako senzor na druhé vrstvě. Tímto způsobem je provedena skladba n-vrstev keramických substrátů 1 s plošnými motivy 2 a 3, čímž vznikne jeden 3D senzor. Pro minimalizaci mezizávitové kapacity senzoru jsou závity motivů na lichých vrstvách substrátu 1 umístěny v místech mezer závitů motivů umístěných na sudých vrstvách substrátu 1.

45 Elektrické a mechanické spojení plošných motivů 2 a 3 na jednotlivých substrátech 1 je realizováno pomocí vodivé pasty tištěné a vypalované stejným způsobem jako při vytváření motivů senzoru na substrátech 1. Nejprve jsou natištěny a vypáleny jednotlivé substráty 1 s plošnými motivy 2 a 3 vytvořenými tlustovrstvými pastami, s výhodou na bázi Cu, nebo Pt, nebo W, včetně vodivé pokovených otvorů 4 v keramických substrátech 1, následně je na již vypálené vodivé motivy 2 a 3 aplikována další vrstva vodivé pasty, tj. jsou vytvořeny fixační body 5, které slouží rovněž pro elektricky vodivé propojení. Jednotlivé substráty 1 jsou navrstveny v sesazovacím přípravku na sebe a následně jsou vypáleny v peci za stejných podmínek jako jednotlivé substráty 1. 3D struktura senzoru se vzdáleností jednotlivých vrstev plošných cívek více než 0,3 mm umožňuje dosažení 55 nízké hodnoty mezizávitové kapacity a tedy vysoké vlastní rezonanční frekvence. Dále jsou

přítomny fixační body 6 s výhodou z vypálené Cu, Pt, nebo W pasty bez elektrického vodivého propojení motivů 2 a 3.

- 5 Na obr. 4 je znázorněno půdorysné zobrazení prvních dvou vrstev sendvičové struktury, konkrétně plošných motivů 2 a 3 tvořících závit cívk, a dále je na obr. 4 znázorněn boční řez sendvičovou strukturou senzoru.

Příklad 2

- 10 Na obr. 6 je znázorněn senzor se sendvičovou strukturou, který je v každé vrstvě opatřen kontaktními plochami 7 pro nanášení fixačních bodů 5 a 6.

Příklad 3

- 15 Na obr. 7 je znázorněn senzor se sendvičovou strukturou, který se liší oproti příkladu 1 a 2 tím, že fixační body 6 nesloužící k elektrickému propojení zasahují do plošného motivu 3. Zatímco v předcházejících příkladech uskutečnění senzoru byly fixační body 6 uspořádané okolo obvodu substrátů 1, v tomto příkladu kopírují vodivý motiv a stávají se jeho součástí, čímž je fixace z hlediska pevnosti sendvičové struktury spolehlivější.

20

Příklad 4

- Na obr. 8 je znázorněn senzor se sendvičovou strukturou, který má plošné vodivé motivy 2, 3 a 8, současně na lícových a rubových stranách substrátů 1. Motivy 2 a 3 se stále ve vrstvách střídají na lícových stranách substrátů 1, přičemž na každé rubové straně substrátu 1 se nachází protilehlý rubový motiv 8. Tím je dosaženo větší hustoty závitů výsledné cívk senzoru.

25

Příklad 5

- 30 Na obr. 9 je znázorněn senzor se sendvičovou strukturou, který má na první pozici sendvičové struktury uspořádaný horní doplňkový substrát 9 bez plošných motivů 2, 3 a 8. Materiálové složení horního doplňkového substrátu 9 je stejné jako u substrátů 1 nesoucích plošné motivy 2, 3 a eventuálně i 8. Horní doplňkový substrát 9 slouží k ochraně plošného motivu 2 prvního substrátu 1.

35

Příklad 6

- Na obr. 10 je znázorněn senzor se sendvičovou strukturou, který je opatřen jak horním doplňkovým substrátem 9, tak spodním doplňkovým substrátem 10.

40

Příklad 7

- Na obr. 11 a 12 je znázorněn senzor se sendvičovou strukturou, který má horní doplňkový substrát 11 opatřený horním polem bodů 12 z materiálu plošných motivů 2 a 3. Horní pole bodů 12 je symetrické a množství materiálu pro vytvoření horního pole bodů 12 odpovídá s tolerancí množství materiálu tvořícímu sousedící plošný motiv 2.

45

- Z obr. 12 je patrné, že je senzor opatřen spodním doplňkovým substrátem 13 s vlastním spodním polem bodů 14. Spodní pole bodů 14 je symetrické a množství materiálu pro vytvoření spodního pole bodů 14 odpovídá s tolerancí množství materiálu tvořícímu sousedící plošný motiv 3.

50

- Obě pole bodů 12 a 14 jsou tzv. kompenzačními vrstvami, přičemž díky odpovídajícímu objemu materiálu vztaheno k plošným motivům 2 a 3 je dosaženo vyrovnané bilance toku β -elektronů vyražených neutronovým tokem ve všech vrstvách senzoru a tím dochází ke kompenzaci efektů typu RIC a RIEMF.

55

Z obr. 13a je patrné, že horní pole bodů 12 a spodní pole bodů 14 nejsou zapojené do cívky tvořené závitů z jednotlivých vrstev sendvičové struktury.

5 Příklad 8

Na obr. 14 a 15 je znázorněn senzor se sendvičovou strukturou, který se od příkladu 7 liší tím, že má obě pole bodů 12 a 14 elektricky propojené do hřebenových struktur 15 pro odvedení elektrického náboje.

10

Příklad 9

Z obr. 4 předcházejícího příkladu, kde jsou znázorněny průměty ze dvou vrstev s plošnými motivy 2 a 3 je patrné, že tyto plošné motivy 2 a 3 zabírají podstatnou část průmětu sendvičové struktury v jedné ose prostoru. Vhodným návrhem designu plošných motivů u dalších vrstev sendvičové struktury je možné aktivní plochou závitů cívky obsadit téměř celý průmět sendvičové struktury.

15

Současně je z ilustračních obrázků 3b a 3c patrné, že v ostatních osách plošné motivy netvoří ve složeném průmětu souvislou plochu, tudíž v těchto ostatních osách je senzor na magnetické pole málo citlivý. Detailněji znázorněno na obr. 13a a na obr. 17, kde průměty vodivých motivů zabírají zhruba 50 % z celkového průmětu. V porovnání s klasickou cívku se závitem navinutým na jádro (viz obr. 13b), je to poloviční výsledný průmět. Magnetické pole směřující mimo hlavní osu měření tedy účinkuje na vyvinutou sendvičovou strukturu s nižším vedlejším účinkem.

20

25 Příklad 10

Na obr. 16 je znázorněno schematicky příkladné provedení tzv. twistovaného propojení plošných motivů senzoru pro minimalizaci citlivosti signálu z nežádoucích směrů.

Toto sčítání průmětů jednotlivých plošných motivů do souvislé plochy celkového průmětu sendvičové struktury se při navrhování konkrétních uskutečnění vyvinutých senzorů nazývá novým pojmem 3D twistované vinutí výsledné cívky.

30

Příklad 11

35

Na obr. 17 je schematicky znázorněna výsledná cívka provedení senzoru se sendvičovou strukturou, která díky prostorovému uspořádání a propojení jednotlivých vrstev dosahuje vedení signálu v konstantních nebo vzájemně blízkých teplotních gradientech a s potenciálem vzájemného odčítání těchto gradientů.

40

Neutronové ionizující záření proniká postupně vrstvami plošných motivů, čímž jsou jednotlivé vrstvy plošných motivů bombardovány částicemi nerovnoměrně a dochází v plošných motivech ke vzniku lokálních termočlánků. Aby signál měření odpovídal přibližně střední hodnotě a nebyl během průchodu cívku – kontinuální smyčkou složenou z jednotlivých vrstev postupně ovlivňován rozdílem gradientů termoelektrického jevu, tak je elektrické propojování vrstev plošných motivů provedeno tak, že se propojí první dvojice vrstev v pořadí sendvičové struktury s poslední dvojicí vrstev v pořadí sendvičové struktury, načež následuje připojení předposlední dvojice vrstev v pořadí sendvičové struktury a druhé dvojice vrstev sendvičové struktury. Toto „křívání“ jako po U rampě se opakuje, dokud nejsou takto propojeny všechny vrstvy plošných motivů do jediné smyčky cívky.

45

50

Tím je dosaženo co nejvyrovnanější bilance případného vzniku lokálních termočlánků ve vinutí, čímž dochází ke kompenzaci efektů typu RITES a TIEMF a současně k minimalizaci plochy kombinovaného průmětu plošných motivů ve směru kolmém k snímací ose senzoru. Tuto architekturu lze s výhodou využít v obou vedlejších osách senzoru.

55

Toto propojování jednotlivých plošných motivů se při navrhování konkrétních uskutečnění vyvinutých senzorů nazývá novým pojmem „nuofilární“ vinutí výsledné cívky.

5 Příklad 12

Na obr. 18 je schematicky znázorněno zapojení vyvinuté cívky kombinující 3D twistované a nuofilární vinutí na cívce ve vytvořené sendvičové struktuře. Substráty 1 mají pro umožnění tohoto návrhu více než jeden pokovený otvor 4.

10

Průmyslová využitelnost

15 Senzor pro měření magnetického pole podle technického řešení nalezne uplatnění v oblasti výzkumu a energetiky, zejména při výrobě fúzní energie.

NÁROKY NA OCHRANU

1. Senzor pro měření magnetického pole zahrnující nejméně jeden vinutý elektrický vodič pro indukci elektrického napětí penetrujícím proměnlivým magnetickým polem, dále zahrnující izolaci závitů vinutého elektrického vodiče pro zamezení jejich elektrického styku, a dále zahrnující elektrické kontakty uspořádané na koncích vinutého elektrického vodiče pro připojení externího zařízení, **vyznačující se tím**, že zahrnuje nejméně dva substráty (1) z keramického izolačního materiálu uspořádané do sendvičové struktury s rozestupy mezi substráty alespoň 0,2 mm, dále že je vinutý elektrický vodič tvořen alespoň jedním plošným motivem (2) uspořádaným k alespoň jedné ze stran substrátů (1), a dále že mají jednotlivé substráty (1) pokovené otvory (4) pro elektrické propojení jejich rubové a lícové strany, přičemž jsou elektrické kontakty uspořádané z vnějšku sendvičové struktury, a dále že je keramický izolační materiál substrátů (1) ze skupiny Al_2O_3 , nebo AlN , nebo MgAl_2O_4 , a plošný motiv (2) je z materiálu ze skupiny Cu, Pt, W.

2. Senzor podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že sousedící plošné motivy (2, 3) jsou v zákrytu max. z 20 %.

3. Senzor podle nároku 1 nebo 2, **vyznačující se tím**, že mezi sousedícími substráty (1) je vytvořen z materiálu plošného motivu (2) alespoň jeden fixační bod (6).

4. Senzor podle nároku 1 nebo 2, **vyznačující se tím**, že mezi sousedícími substráty (1) je vytvořen z materiálu plošného motivu (2) alespoň jeden fixační bod zasahující do sousedících plošných motivů (2, 3) pro jejich elektrické propojení.

5. Senzor podle některého z nároků 1 až 4, **vyznačující se tím**, že sendvičová struktura zahrnuje nejméně jeden doplňkový substrát (9, 10) bez plošného motivu, přičemž je doplňkový substrát (9, 10) v sendvičové struktuře uspořádán na jejím začátku, a/nebo na jejím konci, a/nebo uvnitř.

6. Senzor podle nároku 5, **vyznačující se tím**, že doplňkový substrát (9, 10) uspořádaný na začátku a/nebo na konci sendvičové struktury je na straně odvrácené od sendvičové struktury opatřen polem bodů (12, 14), nebo hřebenovou strukturou (15), z elektricky vodivého materiálu.

7. Senzor podle nároku 6, **vyznačující se tím**, že celkový objem materiálu tvořícího pole bodů (12, 14), nebo hřebenovou strukturu (15), se rovná objemu materiálu sousedícího plošného motivu (2, 3, 8) s tolerancí nejvýše $\pm 20\%$.

8. Senzor podle některého z nároků 1 až 7, **vyznačující se tím**, že plošné motivy sendvičové struktury jsou propojené do jediné smyčky, přičemž kombinovaný průmět plošných motivů (2, 3, 8) ve směru kolmém k snímací ose senzoru tvoří magneticky aktivní souvislou plochu s obsahem do 50 % z celkové plochy průmětu plošných motivů.

9. Senzor podle některého z nároků 1 až 8, **vyznačující se tím**, že plošné motivy (2, 3, 8) sendvičové struktury jsou propojené do smyčky, přičemž začátek smyčky zahrnuje postupně plošné motivy lichých pozic sendvičové struktury v pořadí od první do poslední a konec smyčky zahrnuje postupně plošné motivy sudých pozic sendvičové struktury v pořadí od poslední k první.

10. Senzor podle některého z nároků 1 až 8, **vyznačující se tím**, že plošné motivy (2, 3, 8) sendvičové struktury jsou propojené do smyčky, přičemž začátek smyčky zahrnuje první plošný motiv z pořadí sendvičové struktury a na něj navazující poslední plošný motiv z pořadí sendvičové struktury, střed smyčky zahrnuje druhý a n-další plošný motiv z pořadí sendvičové struktury a na něj navazující předposlední a n-další motiv z pořadí sendvičové struktury, a současně konec smyčky zahrnuje prostřední plošné motivy z pořadí sendvičové struktury.

11. Senzor podle některého z nároků 1 až 8, **vyznačující se tím**, že plošné motivy (2, 3, 8) sendvičové struktury jsou propojené do smyčky, přičemž začátek smyčky zahrnuje dvojici plošných

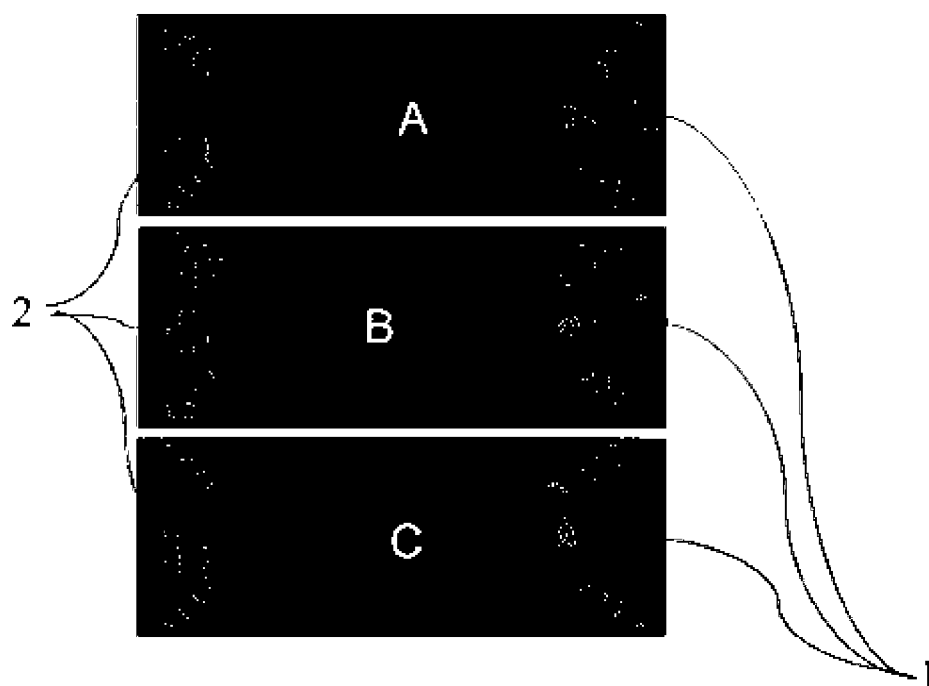
5

motivů prvních z pořadí sendvičové struktury a na ni navazující dvojici plošných motivů posledních z pořadí sendvičové struktury, přičemž je zachováno pořadí vrstev plošných motivů, střed smyčky zahrnuje dvojici plošných motivů druhou a n-další z pořadí sendvičové struktury a na ni navazující dvojici plošných motivů předposlední a n-další z pořadí sendvičové struktury, a současně konec smyčky zahrnuje prostřední dvojici plošných motivů z pořadí sendvičové struktury.

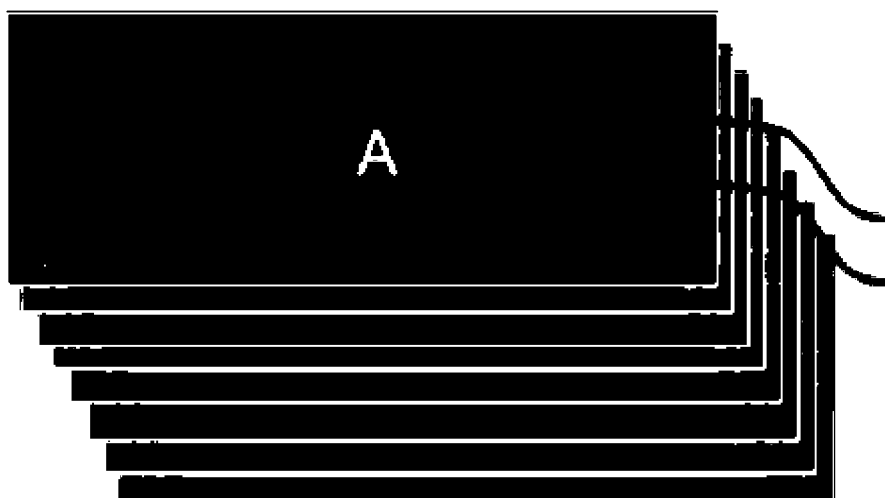
17 výkresů

Seznam vztahových značek:

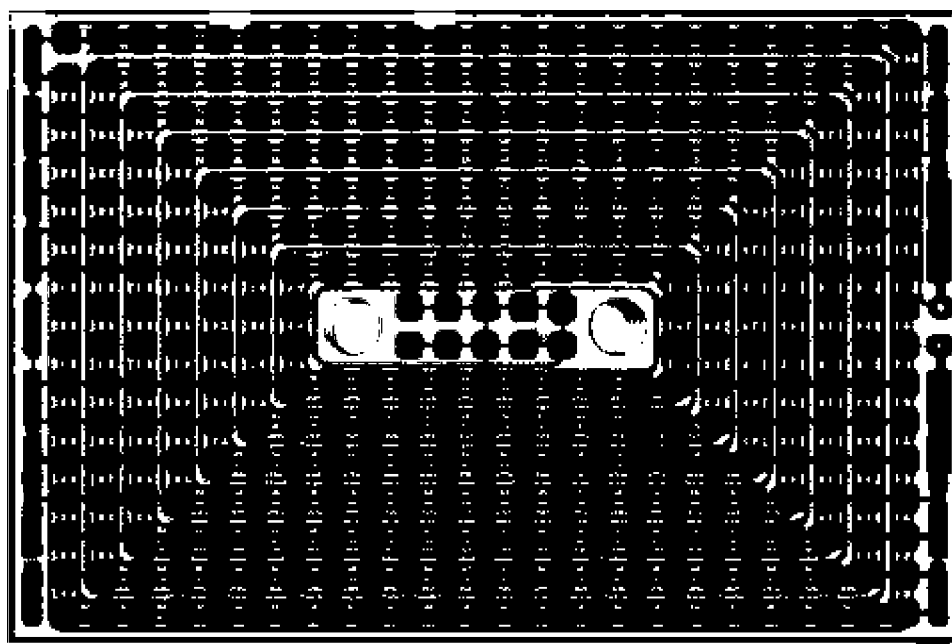
- 1 keramický substrát
- 2 první plošný motiv
- 3 druhý plošný motiv
- 4 pokovený otvor
- 5 fixační bod s elektricky vodivým propojením vrstev sendvičové struktury
- 6 fixační bod bez elektricky vodivého propojení vrstev sendvičové struktury
- 7 kontaktní plocha
- 8 rubový motiv
- 9 horní doplňkový substrát
- 10 spodní doplňkový substrát
- 11 kompenzační horní doplňkový substrát s polem bodů
- 12 horní pole bodů
- 13 kompenzační spodní doplňkový substrát s polem bodů
- 14 spodní pole bodů
- 15 hřebenová struktura



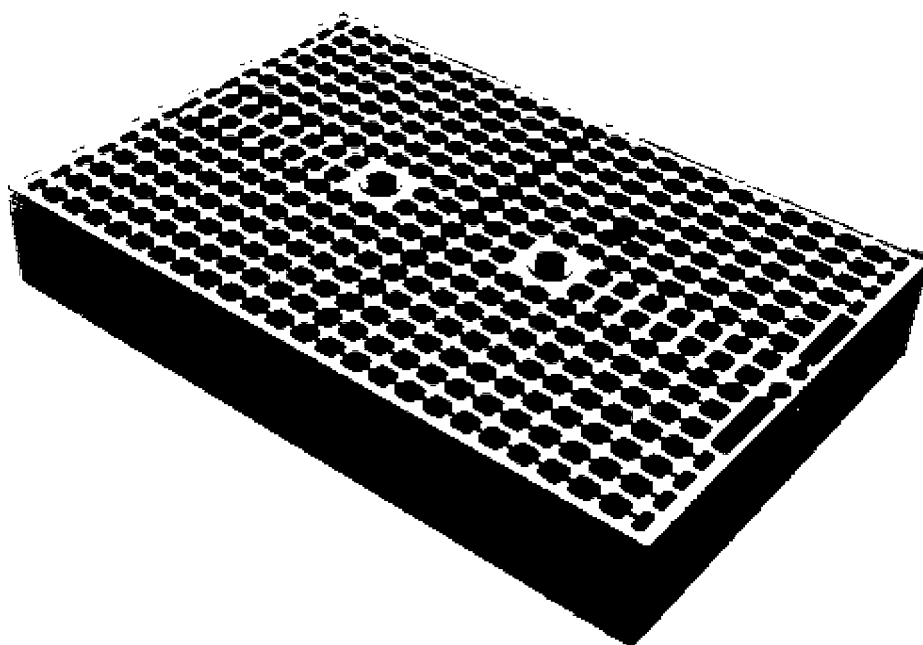
Obr. 1a



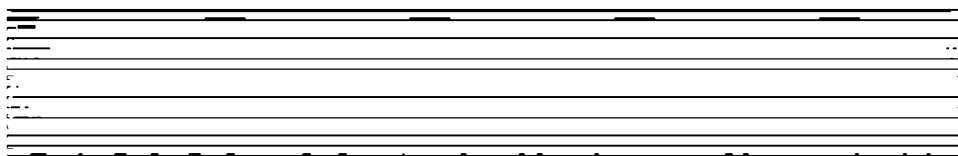
Obr. 1b



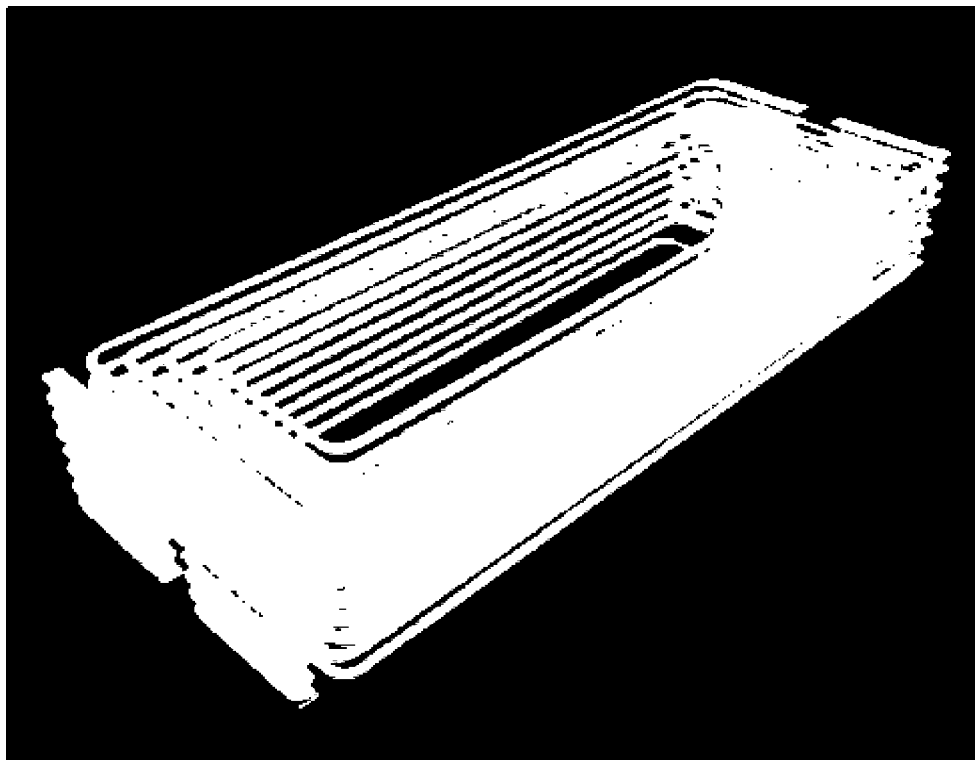
Obr. 2a



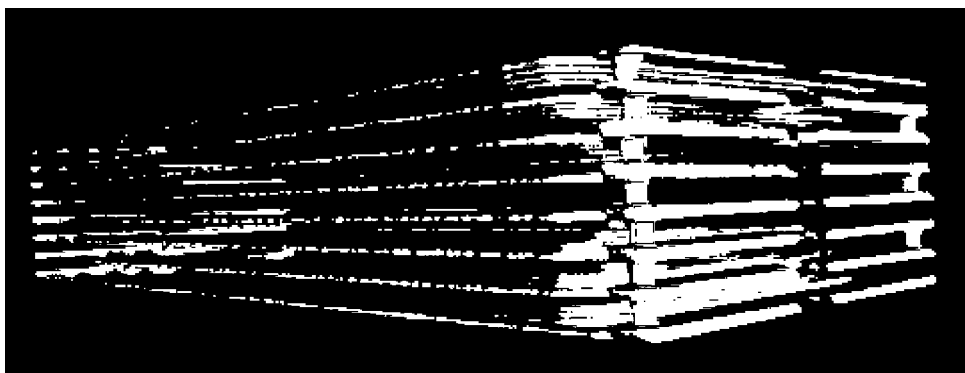
Obr. 2b



Obr. 2c



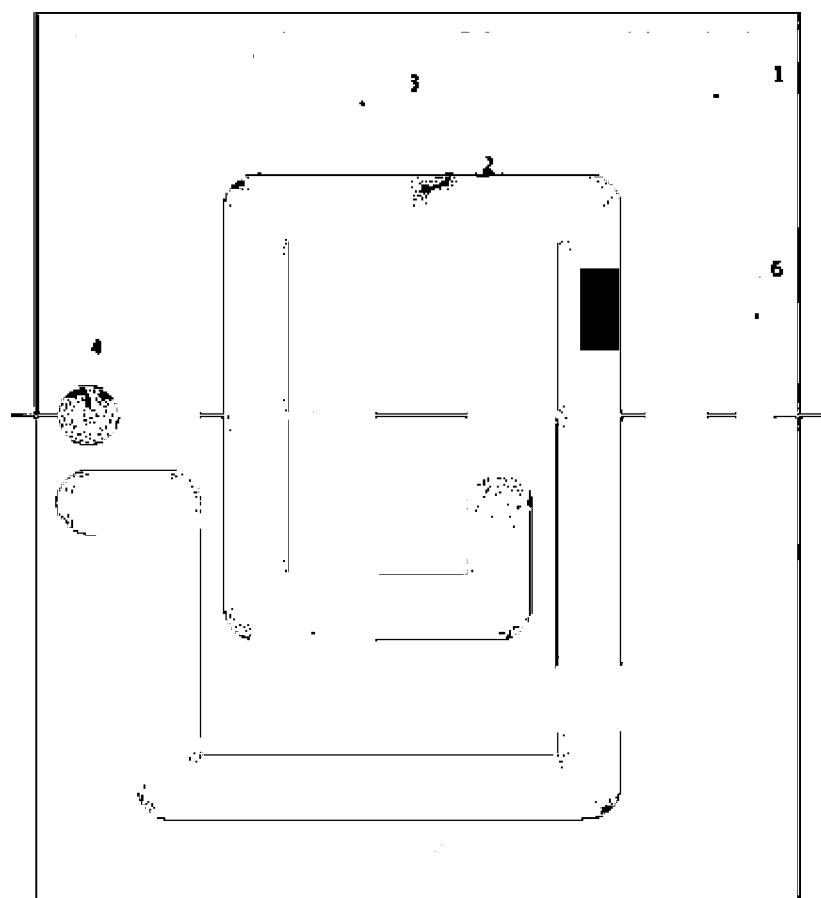
Obr. 3a



Obr. 3b



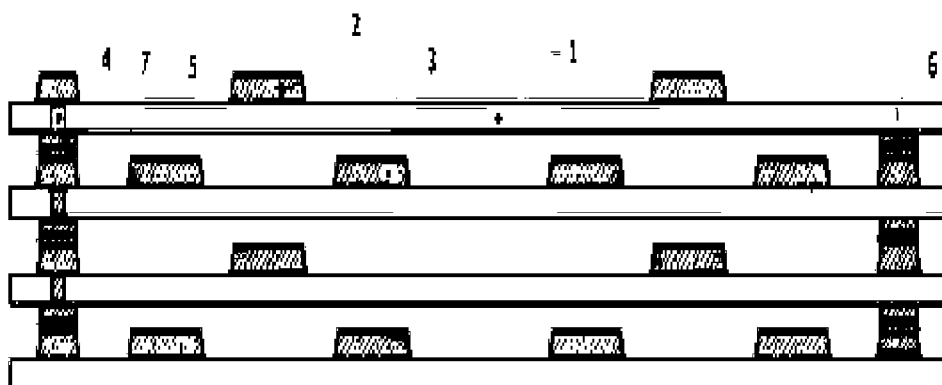
Obr. 3c



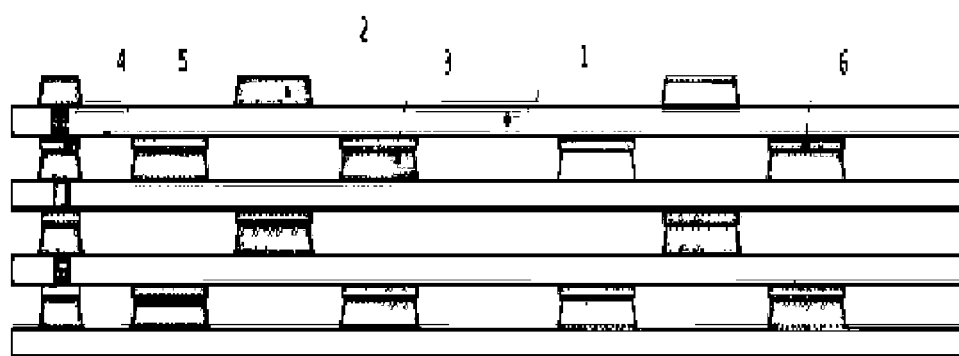
Obr. 4



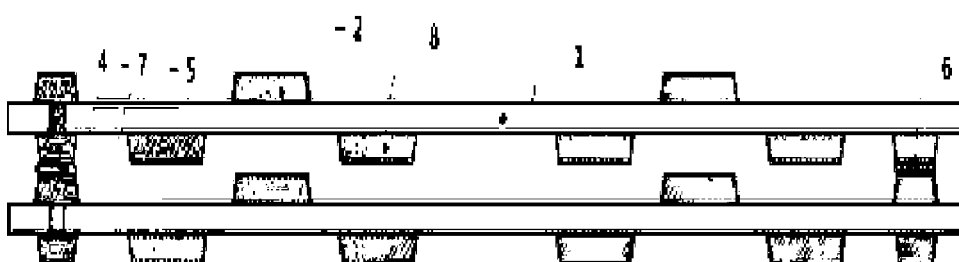
Obr. 5



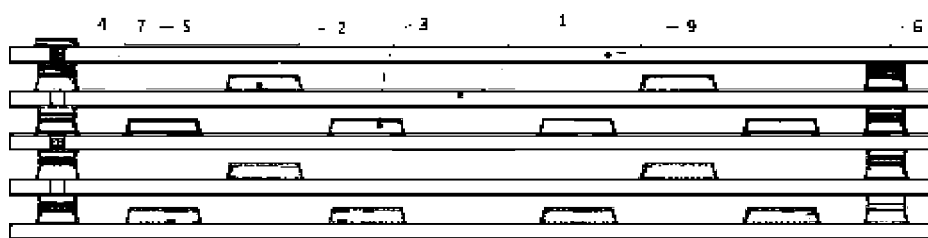
Obr. 6



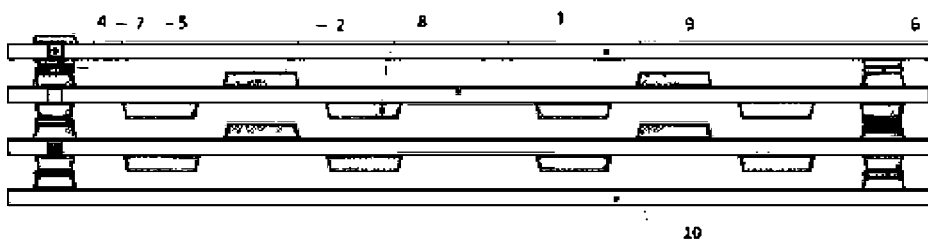
Obr. 7



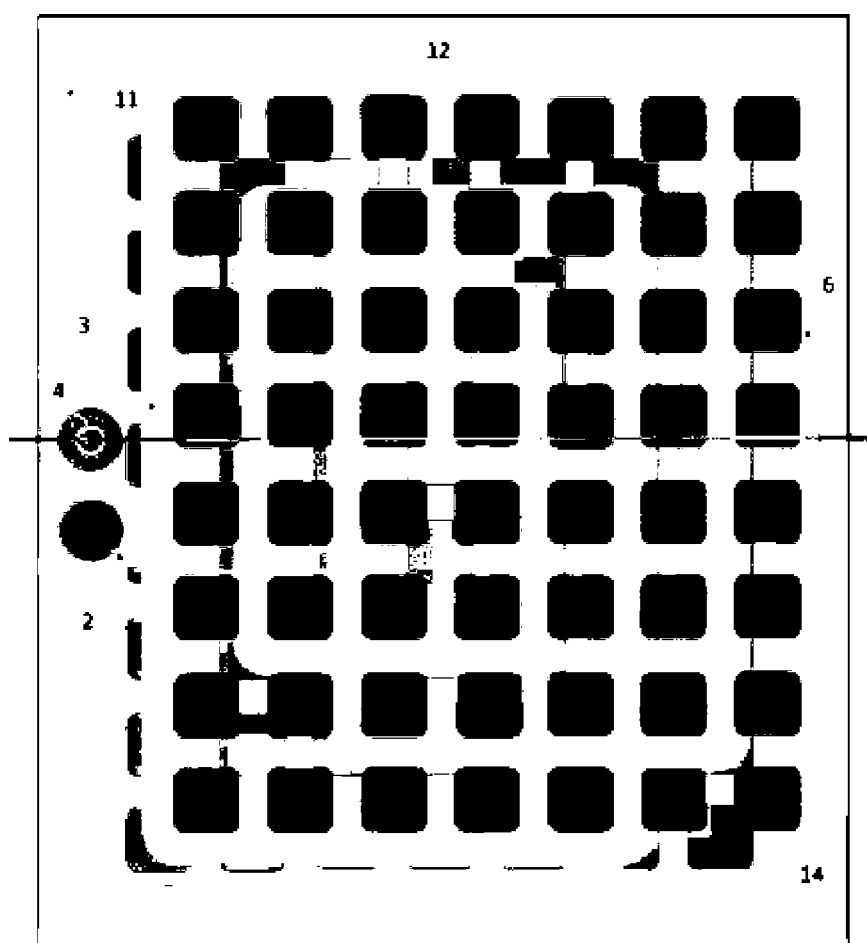
Obr. 8



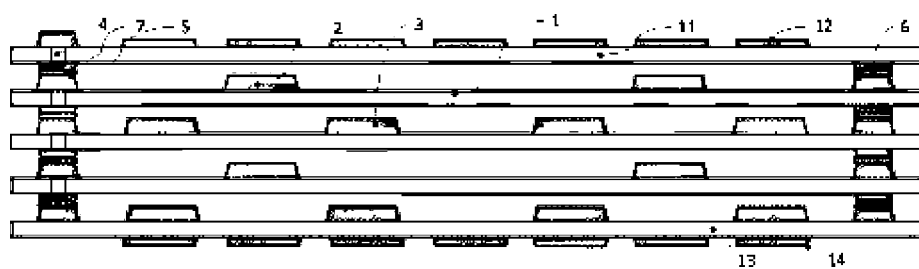
Obr. 9



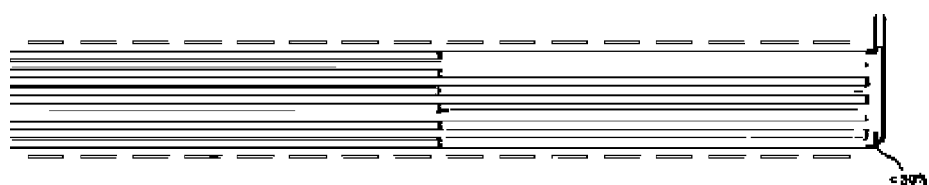
Obr. 10



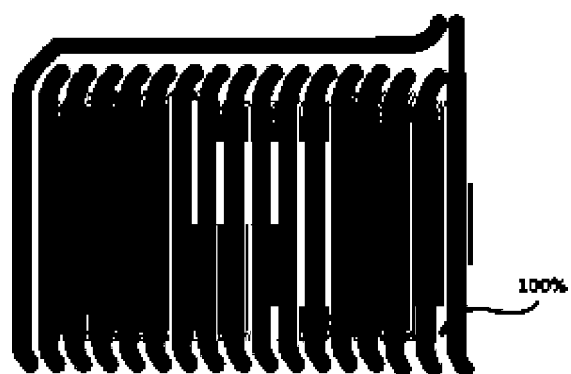
Obr. 11



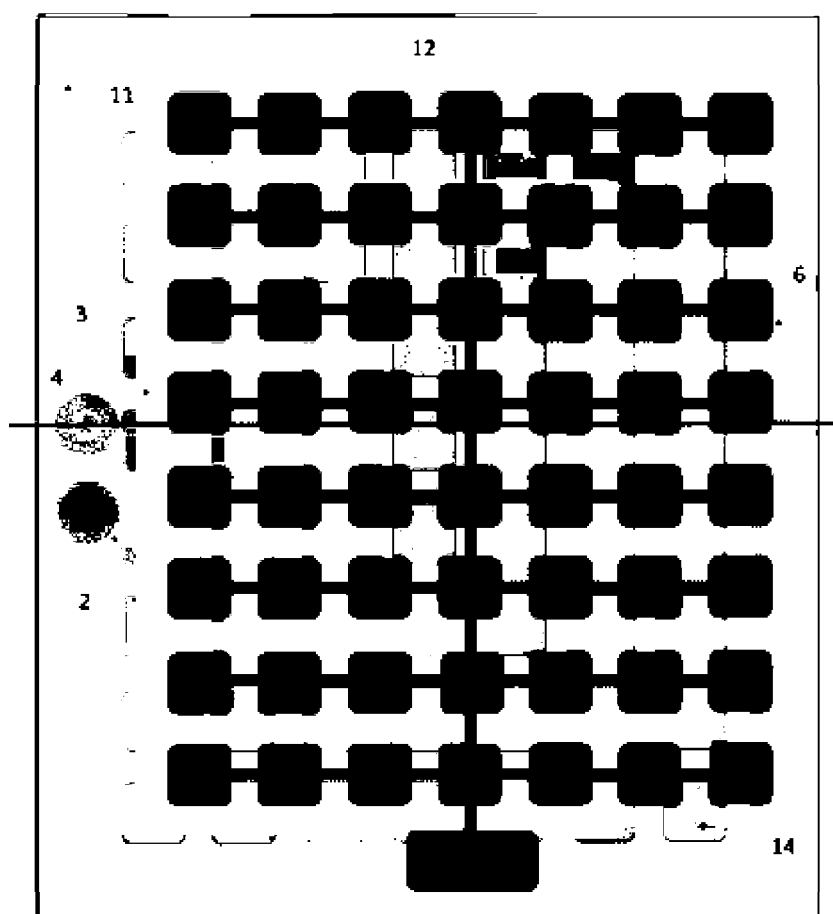
Obr. 12



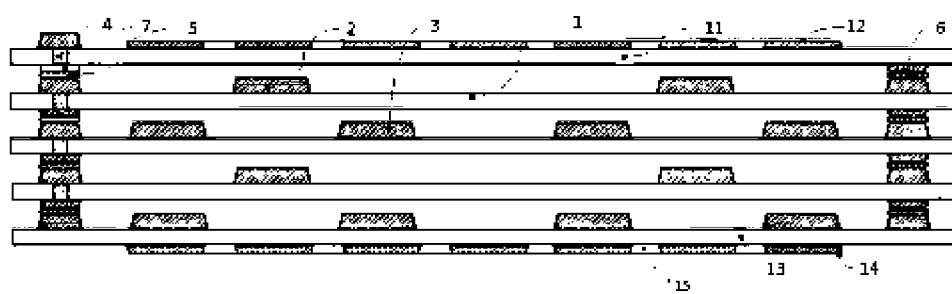
Obr. 13a



Obr. 13b



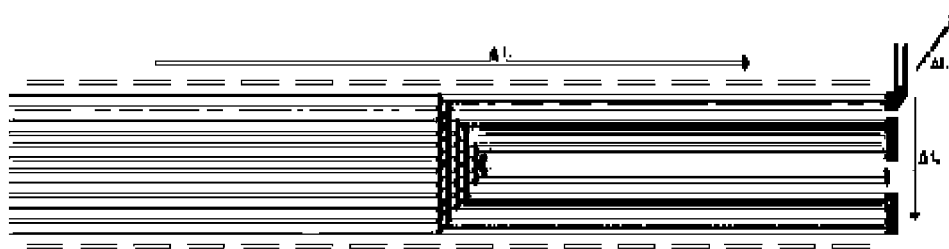
Obr. 14



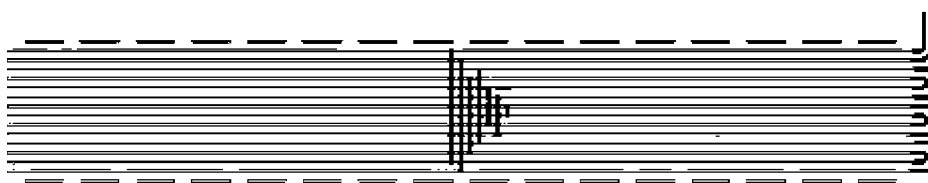
Obr. 15



Obr. 16



Obr. 17



Obr. 18