

SEMICONDUCTOR STRAIN GAUGES IN EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS, THEIR ADVANTAGES AND LIMITATIONS

POLOVODIČOVÉ TENZOMETRY V EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZE NAPJATOSTI, JEJICH PŘEDNOSTI A OMEZENÍ

Ladislav Hrubant, Jan Hrubant

Abstract:

Semiconductor strain gauges transforming strain into an electrical signal with an efficiency up to a hundred times greater than the metallic. Semiconductor strain gauges, beside merits, also have their limitations and hitherto unutilized potential. Their properties, important for optimal use, are dealt with in this work.

KEYWORDS: Semiconductors, Strain Gauges, Experimental stress analysis

1. Úvod

Díky piezorezistenci převádějí polovodiče deformaci na elektrický signál s účinností až stokrát vyšší, než drátkové a foliové tenzometry, se stejně dobrou reprodukovatelností.

Piezorezistenci objevil u germania a křemíku v roce 1954 C.S. Smith [1]. Působí ji struktura energetických pásů polovodičů a projevuje se výraznými změnami měrného elektrického odporu germania a křemíku, při jejich deformaci v určitých krystalografických směrech.

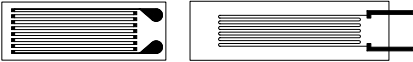
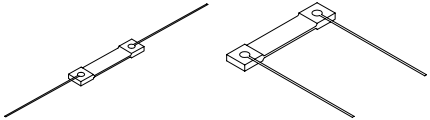
První křemíkové tenzometry se objevily na trhu v roce 1959, za pět let po objevu piezorezistence, během kterých byla vyvíjena jejich výrobní technologie, včetně mechanicky odolného spojení křemíku a kovových vývodů. Hromadnou výrobu postupně zavedly USA, důsledně embargoující vývoz do zemí potenciálních nepřátel, pak Japonsko, nadnárodní koncern Philips a Česká republika. Nyní se vyrábí i v Rusku a Číně. Producentů zemí je celosvětově méně než deset.

Využití piezorezistence polovodičů v odporové tenzometrii rozšířilo možnosti jejího využití i na úlohy řešitelné dříve jen obtížně, nebo neřešitelné vůbec. Na příklad teprve jimi bylo možné změřit quasistatické namáhání částí turbomotorů, rotujících do 40.000 ot/min, za teplot do 250°C, s potřebnou přesností. Jejich počáteční vysoká cena dovolila seznámení s nimi jen nemnoha pracovištím. Dnes jsou dostupné za cenu foliových tenzometrů a často umožňují dosáhnout přesnější a spolehlivější výsledky.

2. Hlavní rozdíly mezi polovodičovými a kovovými tenzometry

- Jsou působeny specifickými vlastnostmi materiálů jejich aktivních částí. V následujících tabulkách jsou základní údaje o obou typech odporových tenzometrů a charakteristiky materiálů nejvíce používaných pro jejich výrobu

TECHNICKÉ A UŽITNÉ CHARAKTERISTIKY KOVOVÝCH A POLOVODIČOVÝCH TENZOMETRŮ

CHARAKTERISTIKA	MATERIÁL AKTIVNÍ ČÁSTI TENZOMETRU			
	Cu55Ni45	Ni80Cr20	P-typ Si	N-typ Si
Uspořádání				
Aktivní část tenzometru tvoří	mřížka z folie 0.005-0.003 mm nebo z drátku 0.02-0.01mm		monokrystal křemíku délky 2-10 mm, šířky 0.2-1 mm, tloušťky <0.02 mm	
Nosná podložka	nezbytná a nedílná součást tenzometru		podložka není třeba, Si je "samonosný"	
Elektrický odpor	60 Ω - 1 000 Ω	120 Ω - 1 000 Ω	120 Ω - 10 000 Ω	120 Ω - 10 000 Ω
Součinitel deformační citlivosti (K-faktor)	od +2.0 do +2.2 závisí na chemickém složení, mechanickém a tepelném zpracování		+120	-110
Deformace aktivní části tenzometru	do meze pružnosti elastická, nad mezi pružnosti plastická		za teplot do 310°C elastická až do meze pevnosti	
Mezní statická deformace tenzometru [mm/m]	50 - 150	20 - 100	2.5 – 6	2.5 - 6
	závisí na mechanickém a tepelném zpracování i typu nosné podložky		závisí na povrchové úpravě, po úpravě je nepřímo úměrná průřezu	
Lom při mezní statické deformaci	Přetvárný	přetvárný	Křehký	křehký
Mezní deformace při dynamickém zatěžování do 10 ⁷ cyklů [mm/m]	±1.4	±2.0	> ±1.6	> ±1.4
Doporučená deformace tenzometru ve snímači při jmenovitém zatížení snímače [mm/m]	0.9 – 1.25	nevhodný pro výraznou závislost charakteristik na teplotě	0.4 – 1.1	0.4 – 1.0
Modul pružnosti v tahu [MPa]	167 000	217 000	192 000 [1,1,1]	134 000 [1,0,0]
Pracovní teploty	od -200°C do +250°C	od -200°C do 1000°C	od -70°C do +300°C	od -70°C do +300°C
Cena USD/kus (orientační údaj)	4 – 19 (dovozu)	5 – 20 (dovozu)	6 – 16 (VTS Zlín)	6 – 16 (VTS Zlín)

TABULKA 2:

TEPLOTNÍ SOUČINITELÉ MATERIÁLŮ KOVOVÝCH A POLOVODIČOVÝCH ODPOROVÝCH
TENZOMETRŮ (0 – 60°C)

		MATERIÁL AKTIVNÍ ČÁSTI TENZOMETRU			
TEPLOTNÍ SOUČINITEL		Cu55Ni45	Ni80Cr20	P-typ Si	N-typ Si
K-faktoru	$\frac{dK}{dt} \cdot \frac{1}{K} \quad [K^{-1}]$	$+1.0 \times 10^{-4}$	$+4.8 \times 10^{-4}$	-1.8×10^{-3}	-2.3×10^{-3}
elektrického odporu	$\frac{dR}{dt} \cdot \frac{1}{R} \quad [K^{-1}]$	od -5×10^{-5} do $+5 \times 10^{-5}$ závisí na chemickém složení, mechanickém a tepelném zpracování		$+9 \times 10^{-4}$	$+10 \times 10^{-4}$
délkové roztažnosti	$\frac{dL}{dt} \cdot \frac{1}{L} \quad [K^{-1}]$	$+14 \times 10^{-6}$	$+17 \times 10^{-6}$	$+2.8 \times 10^{-6}$	$+2.8 \times 10^{-6}$

2.1. Materiály aktivních částí kovových tenzometrů

2.1.2. Slitina Cu55-60Ni45-40

Vyrábějí se z ní foliové tenzometry pro teploty od -200°C do $+260^{\circ}\text{C}$ proto, že její teplotní součinitel odporu výrazně závisí na stupni tváření polotovaru za studena a jeho následném tepelném zpracování. Kombinací stupně tváření a výše ohřevu lze nastavit hodnotu teplotního součinitele odporu tenzometrů na hodnoty v rozmezí $-5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ až $+5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ a splnit tím podmínku pro kompenzaci teplotního posunu nulové hodnoty, kterou působí rozdíl teplotní roztažnosti mřížky tenzometru a měřeného objektu, vyjádřený vztahem (1):

$$\alpha_R = -K(\alpha_{\text{Imat}} - \alpha_{\text{Itenzo}}) \quad (1)$$

α_R teplotní součinitel odporu tenzometru $[K^{-1}]$

K součinitel deformační citlivosti tenzometru

$\alpha_{L \text{ mat}}$ součinitel teplotní roztažnosti objektu $[K^{-1}]$

$\alpha_{L \text{ tenzo}}$ součinitel teplotní roztažnosti tenzometru $[K^{-1}]$

Z běžných konstrukčních materiálů má nejmenší teplotní roztažnost titan a jeho slitiny, $\alpha_L = 8.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, hodnota α_R se pro ně nastavuje na $+10.6 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Největší roztažnost mají slitiny hořčíku, $\alpha_L = 26.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, pro které se α_R nastavuje na $-24 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

2.1.2. Slitina Ni80Cr20

Slouží pouze k výrobě tenzometrů pro vyšší pracovní teploty až do 1000°C . Má výraznou teplotní závislost odporu, kterou lze v rozmezí teplot -200°C až 370°C kompenzovat smyčkou z platiny. Používá se zejména pro dynamická měření, staticky s ní lze měřit do 540°C . Pracoviště provádějící měření za vyšších teplot si často sama zhotovují drátkové tenzometry z této slitiny na podložkách z tenkého asbestového "papíru", protože jejich výrobní technologie není obtížná.

2.2. Materiály aktivních částí polovodičových tenzometrů

se již vyrábějí pouze z křemíku, který zcela vytlačil germanium svým příznivějším souhrnem vlastností. Závislost odporu polovodičů na deformaci je až stokrát výraznější než u kovů a vyjadřuje ji vztah (2).

$$\frac{\Delta R}{R} = C_1 \cdot \varepsilon + C_2 \cdot \varepsilon^2 \quad (2)$$

kde ΔR změna odporu tenzometru $[\Omega]$ způsobená deformací ε

R odpor nedeformovaného tenzometru $[\Omega]$

C_1, C_2 konstanty deformační rovnice

ε poměrná deformace $[m/m]$

Někteří výrobci křemíkových tenzometrů neuvádějí konstantu C_2 , ale pouze hodnotu C_1 a odchylku od linearity v rozmezí deformací od $-1 \cdot 10^{-3}$ do $+1 \cdot 10^{-3}$. Nejvíce používané tenzometry, s minimální dosažitelnou závislostí odporu na teplotě, mají $C_1=+120$, $C_2=4000$ a odchylku od linearity nepřevyšující $\pm 0.75\%$ celkové změny odporu.

2.2.1. P-typ křemíku

Má deformační citlivost kladnou, tahová deformace odpor tenzometru zvětšuje, tlaková zmenšuje. Podélná osa aktivní části je orientována do krystalografického směru $[1,1,1]$, který má nejvyšší deformační citlivost. Tenzometrie využívá citlivosti:

- od $C_1 = +50$, s minimální teplotní závislostí a hodnotou C_2

- do $C_1 = +175$, u které jsou ještě přijatelné hodnoty C_2 a teplotních součinitelů odporu a deformační citlivosti. Hodnoty C_1 a C_2 jsou přímo úměrné měrnému odporu a pro vyrobený tenzometr jsou konstantami.

2.2.2. N-typ křemíku

má zápornou deformační citlivost, tahová deformace jeho odpor zmenšuje, tlaková zvětšuje. Deformační citlivost je nejvýraznější v krystalografické ose $[1,0,0]$. Absolutní hodnota C_1 a hodnota C_2 jsou rovněž přímo úměrné měrnému odporu. N-typ má vyšší teplotní součinitel odporu než p-typ a při téže hodnotě C_1 má hodnotu C_2 až 4x vyšší. Proto se, s výjimkou samokompenzovaných tenzometrů n-typ nepoužívá samostatně, ale společně s p-typem. Tenzometrie využívá hodnoty C_1 v rozmezí od -90 do $+130$.

Podle vztahu (1) umožňuje záporná deformační citlivost n-typu samokompenzaci rozdílu teplotního posunu nulové hodnoty nalepeného tenzometru, a to výběrem monokrystalu s potřebnou hodnotou K . Samokompenzace je účinná v rozmezí 30°C až 40°C . Teplotní posun nuly lze také kompenzovat půlmůstky sestavenými z p- a n-typu, v teplotním rozmezí kolem 70°C .

3. Odolnost křemíkových tenzometrů proti mechanickému namáhání

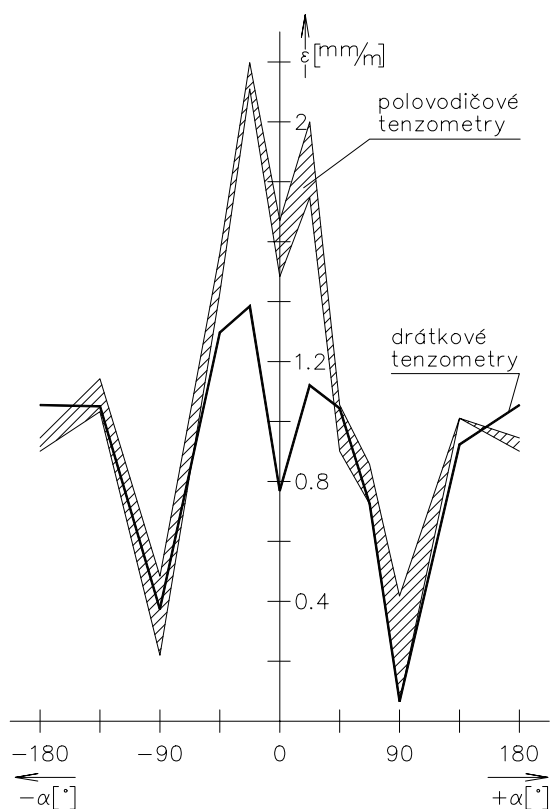
Je základním měřítkem kvality odporového tenzometru proto, že funkce tenzometru je podmíněna mechanickou deformací.

Křemík je křehký asi jako běžné sklo. Jako všechny křehké materiály má podstatně vyšší odolnost proti namáhání tlakem, než tahem. Tenké křemíkové pásky se při tahovém namáhání mechanicky porušují při poměrných deformacích 1.2×10^{-3} až 1.6×10^{-3} , což pro odporovou tenzometrii nepostačuje. Zvýšení pevnosti se dosahuje úpravou povrchu křemíkové aktivní části a mezní statická deformace pak je nepřímě úměrná příčnému průřezu, a to od 3.5×10^{-3} při 0.008 mm^2 do 9×10^{-3} při 0.002 mm^2 . Při teplotách do 310°C se monokrystalický křemík deformuje pouze elasticky, bez měřitelné plastické deformace a porušuje křehkým lomem.

Záruka mezní statické deformace křemíkových tenzometrů vyžaduje ověření tahové pevnosti každého vyrobeného kusu. Na zkušební nosníky se lepí se kyanoakrylátem a zatěžují v rozmezí $\pm 2.5 \times 10^{-3}$ s prodlevami hladinách po 5×10^{-4} , při kterých se měří odpor pro výpočet konstant C_1 a C_2 . Po zkoušce se lepidlo rozruší dimethylformamidem, mechanicky porušené tenzometry se seškrábou, neporušené sejmou a důkladně očistí. 90% takto odzkoušených tenzometrů má mezní statickou deformaci nad 3.8×10^{-3} . Záruku mezní statické deformace lze zvýšit až na 6×10^{-3} , ovšem za cenu většího podílu výmetu při pevnostní zkoušce.

Odolnost křemíkových tenzometrů proti tahovému namáhání zvyšuje jejich nalepení na měřený objekt lepidly vytvrzujícími za vyšší teploty. Teplotní roztažnost křemíku je zlomkem teplotní roztažnosti běžných konstrukčních materiálů, kovový objekt se $^\circ\text{C}$ chlazením smrští víc než křemík a tenzometr získá tlakové předpětí, jehož velikost je úměrná:

- rozdílu součinitele teplotní roztažností křemíku a kovu
- výši teploty, od které vrstva lepidla přenáší deformaci



Obr.1 Rozdílné maximální deformace změřené drátkovými a křemíkovými tenzometry při stejném quasistatickém namáhání náboje vrtule V 510 [3]

na stejných místech. Výsledky jsou na obr.1.

4.3 Vysoká únavová životnost tenzometrů

Usnadňuje měření na částech s vysokou únavovou životností. Na příklad zkouška únavové životnosti lopatek turbin a axiálních kompresorů leteckého motoru M-601, spočívající v rozkmitání lopatky přerušovaným proudem vzduchu na vlastní frekvenci řádu jednotek kHz, při čemž hladina namáhání se nastaví a kontroluje odporovým tenzometrem. Zvýšení životnosti lopatek výrobcem způsobovalo opakované mechanické poruchy kontrolních metalických tenzometrů, jejichž výměna vyžadovala přerušení zkoušky a činila ji neregulérní.

4.4 Výrazně vyšší spolehlivost výsledků měření

- křemíkové tenzometry dovolují spolehlivě zjistit i malé poruchy adheze či koheze lepidla, spojujícího tenzometr s měřeným objektem, vzniklé při měření, které jsou u kovových tenzometrů zjistitelné obtížně. Tlakové předpětí nalepených křemíkových tenzometrů, je funkcí teploty a umožňuje u všech objektů, které lze podrobit řízenému ohřevu porovnat teplotní závislost odporu tenzometrů před měřením a po něm a získat tak naprostou jistotu o správnosti výsledků měření.
- při dynamických měřeních jsou změny odporu křemíkového tenzometru závislé pouze na deformaci tenzometru až do mezního stavu, kdy se poruší křehkým lomem za okamžitého zvýšení odporu na deseti až stonásobek původní hodnoty, na rozdíl od tenzometrů kovových, kde v blízkosti mezních stavů dochází k posunům jejich nulové hodnoty, jak je zřejmé z obr.2.

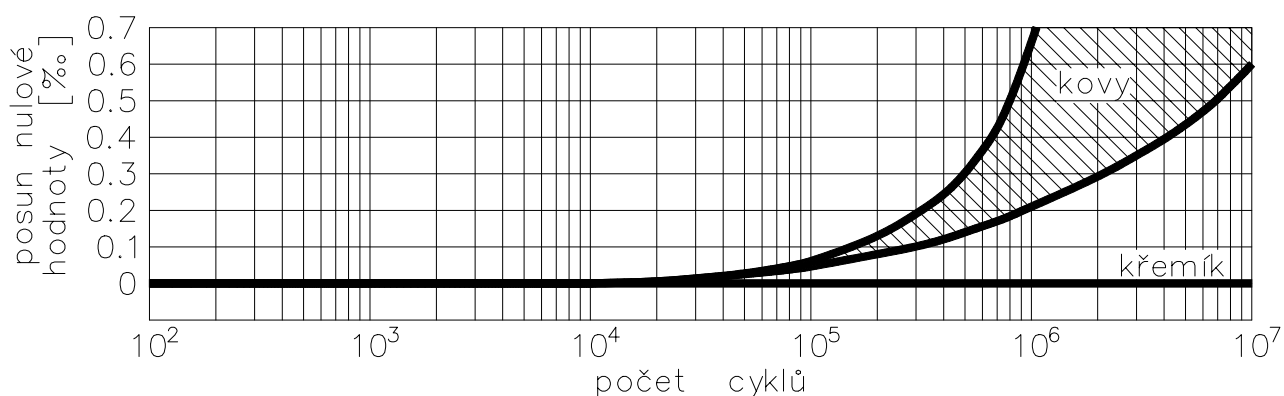
4. Přednosti polovodičových tenzometrů

4.1. Vysoká deformační citlivost

- umožňuje měření v prostředích s až stonásobně silnějšími rušivými elektrickými a magnetickými vlivy.
- při přenosu z signálu z rotujících částí do měřicího řetězce redukuje vliv přechodových odporů a jim působenou nepřesnost na zlomek vyjádřený poměrem součinitelů deformačních citlivostí.
- prahová citlivost je úměrná deformační citlivosti a umožňuje měření poměrných deformací řádu 10^{-9}
- dovoluje méně náročná měření napjatosti univerzálními číslicovými přístroji jakými běžně disponuje většina pracovišť.

4.2 Malá šířka aktivní části

Křemíkový tenzometr bez podložky, tvořený úzkým páskem křemíku spolehlivě měří lokální deformace i na částech s velkými napětovými gradienty. Příkladem je quasistatické namáhání náboje vrtule V510, [3], kde byly křemíkovými tenzometry změřeny deformace až o 57% větší, které nepoměrně širší mřížka drátkových tenzometrů "zprůměrovala". Správnost údajů křemíkových tenzometrů potvrdilo opakované měření s novými tenzometry



Obr.2 Posun nulové hodnoty fóliového a křemíkového tenzometru při namáhání souměrnou střídavou deformací $\pm 1.8\%$

5. Omezení polovodičových tenzometrů

- elastické chování aktivní části křemíkových tenzometrů dovoluje měření statických deformací nejvýše do 9×10^{-3}
- malá teplotní roztažnost křemíku omezuje využitelnost křemíkových tenzometrů pro měření na objektech z makromolekulárních látek. Ty mají teplotní roztažností 20x až 50x větší než má křemík a ohřev o několik desítek $^{\circ}\text{C}$ deformuje tenzometry na hodnoty převyšující jeho mezní statickou deformaci.
- horní pracovní teplota 370°C , při které se odtaví zlaté vývody odtaví od křemíkového pásu. Při zkouškách radiálních kol kompresorů motoru M-602 byly měřeny deformace měřené až do ostavení vývodů při 370°C . Pracovní teplotu lze zvýšit do 500°C , vývody z hliníku a s vývody ze stříbra na 720°C . I když je deformační citlivost při těchto teplotách výrazně nižší, stále o řád převyšují kovové tenzometry.
- náročnější lepení samonosných křemíkových aktivních částí tenzometrů, které nepotřebují nosnou podložku. Při jejich lepení na kovové objekty se elektricky izolující vrstva většinou vytváří přímo na měřeném objektu.

Literatura:

- [1] SMITH C.S., Piezorezistance effect in germanium and silicon, Physical Review 94, 1954, 42-49,
- [2] DEAN M. (Editor), Semiconductor and conventional Strain gages, Academia Press, New York 1962.
- [3] HUJEČEK Z., HOLL M., Experimentální analýza napětí a deformací leteckých vrtulí s kompozitními listy ve VZLÚ, 27.Celošlátná konference Experimentální analýza napětí (EAN°89), NITRA 30.5. až 1.6.1989
- [4] HRUBANT L., HRUBANT J., Technický a ekonomický přínos polovodičových tenzometrů pro měření sil a hmotností, AUTOMATIZACE, r.42, č.8, 1999
- [5] HRUBANT L., HRUBANT J., Optimal Applications of Semiconductor Strain Gauges with Regard to their Advantages and Limitations, 17th DANUBIA-ADRIA SYMPOSIUM ON EXPERIMENTAL METHOD IN SOLIDS MECHANICS, Praha, 11-14.10.2000