

# Použití dvoupásmového pyrometru v průmyslu polovodičů

Rostislav Szeruda,  
Miroslav Krupa

Článek je věnován problematice bezdotykového měření teploty v průmyslu polovodičů. Speciálně jsou diskutovány možnosti, které při řešení vybraných úloh měření teploty křemíku nabízí dvoupásmový (poměrový) pyrometr. K měřením popsaným v článku byl zapůjčen pyrometr Marathon MR od firmy TSI System a sestaven vlastní prototyp dvoupásmového pyrometru na bázi Si/InGaAs. Měření probíhala ve společnosti ON Semiconductor Czech Republic v prosinci 2006 a v lednu 2007.

## 1. Úvod

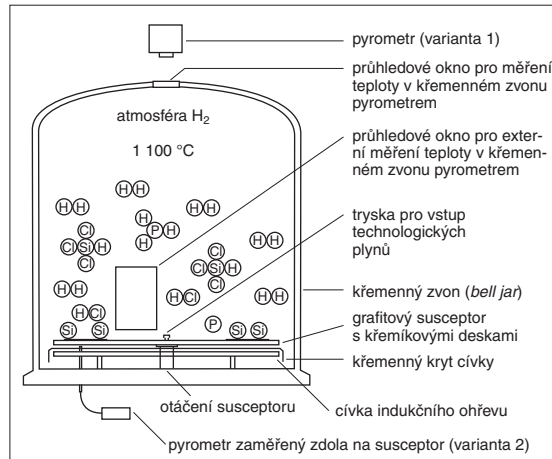
Základním materiálem pro výrobu většiny polovodičových struktur pro elektrotechnický průmysl je velmi čistý monokrystalický kře-



Obr. 1. Pohled na epitaxní reaktor

mík (Si). K jeho výrobě se využívají speciální vysokoteplotní procesy. Zcela zásadní význam při výrobě křemíku mají znalost správné teploty a pochopení probíhajících teplotních procesů. Měřit teplotu kontaktními metodami přítom obvykle není možné, protože by mohlo dojít ke kontaminaci produktu. Charakter výrobního procesu to navíc ani neumožňuje. Proto jsou základem měření teploty při výrobě křemíku bezkontaktní pyrometrické metody.

Měřit teplotu křemíku pyrometry ovšem není jednoduché. Čistý křemík je lesklý materiál, jehož emisivita závisí na skupenství, krystalické struktuře, teplotě, měřené části spektra a také na příměsích přidávaných do křemíku k ovlivnění jeho vodivosti. Mimo to se křemík při výrobě nachází v uzavřeném prostoru technologických zařízení, kde jeho vlastní vyzařování může být ovlivněno parazitními odrazy a vyzařováním stěn pracovní komory. Měří se skrz poměrně tlusté křemenné sklo (tloušťka větší než 5 mm) a pyrometr obvykle nelze ustavit kolmo k měřenému povrchu.



Obr. 2. Schéma epitaxního reaktoru s plochým (pancake) susceptorem a uspořádání pyrometrů

S cílem ověřit některé slibné náměty na zdokonalení technologického procesu výroby křemíku bylo zkoumáno, zda a s jakými výsledky lze dvoupásmový (poměrový) pyrometr použít k:

- minimalizaci vlivu emisivity při měření v epitaxních reaktorech,
- měření podpovrchové teploty křemíku, zaznamenání přítomnosti odlišné křemíkové desky na susceptoru a sledování rychlosti a efektivity leptání vrstvy deponovaného křemíku,
- měření teploty uvnitř tažiček krystalu křemíku.

## 2. Minimalizace vlivu emisivity při měření v epitaxních reaktorech

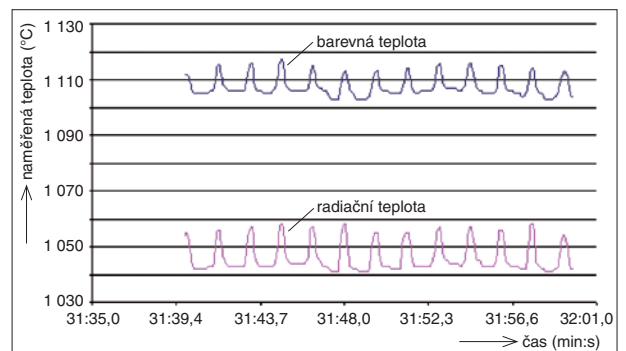
Epitaxe je proces, při němž je na substrát z monokrystalického křemíku nanášena další vrstva křemíku, opět monokrystalického. Substrátem je křemíková deska získaná tažením, nařezáním a vyleštěním monokrystalu křemíku. Nanášená vrstva křemíku se může lišit od substrátu typem vodivosti a vodivosti v závislosti na použitém dopantu. Epitaxní křemíkové desky o průměru 4" a 6" se vyrábějí v zařízeních nazývaných epitaxní reaktory (obr. 1). V nich se ve vodíkové atmosféře při teplotě asi 1 100 °C rozkládá speciální plyn obsahující křemík (např.  $\text{SiHCl}_3$ ), který

se spolu s dopanty deponuje na povrch substrátu.

Teplota v epitaxních reaktorech se měří pyrometry. Pyrometr je buď zaměřen shora skrz malé průhledné okno ve vrcholové části zvonu z křemenného skla (křemenný zvon, bell jar) ohraničujícího reakční prostor na susceptor (grafitový nosič křemíkových desek), nebo je naopak pyrometr s optickým vláknem zaměřen na spodní část susceptoru (obr. 2). Teplota se v obou případech kontroluje a nastavuje externím pyrometrem skrz průhledné okno na boční straně skleněného zvonu (obr. 3). Použití



Obr. 3. Pohled do komory reaktoru na susceptor s křemíkovými deskami



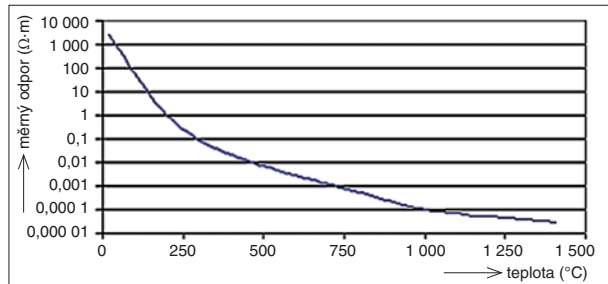
Obr. 4. Teploty křemíkových desek v horní zóně susceptoru naměřené pyrometrem Marathon MR

pyrometrů pro měření teploty s sebou nese citlivost měření na emisivitu povrchu, jehož teplota se měří.

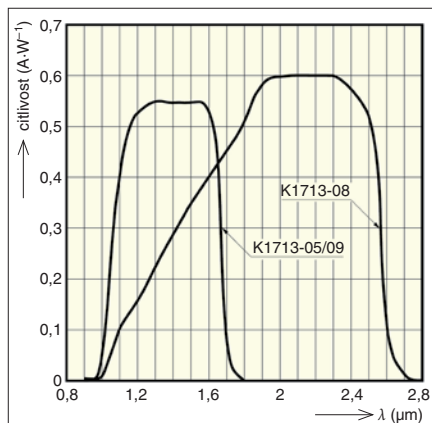
Stejně jako u mnoha jiných průmyslových měření teploty není pro vlastní výrobu nutné znát přesnou teplotu křemíkových desek, ale spíše se pracuje s teplotou „relativní“ (tzv. pracovní), která proces dobře charakterizuje a zaručuje jeho opakovatelnost. Samozřejmě, že čím více se pracovní teplota blíží skutečné teplotě křemíkové desky v reaktoru, tím lépe. Lepší znalost teploty křemíku a jejího rozložení na měřeném

(rozdíl teploty naměřené a skutečné 40 K). Barevná teplota odpovídá skutečné teplotě měřeného povrchu materiálu za předpokladu, že se měří na natolik blízkých vlnových délkách  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$ , aby se měřený povrch choval jako tzv. šedý ( $\epsilon_{\lambda_1} = \epsilon_{\lambda_2}$ ).

Pro měření byl od firmy TSI System zapůjčen poměrový pyrometr Marathon MR, který pracuje na dvou blízkých vlnových délkách v okolí  $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$  (systém fotodetektorů Si/Si) a umožňuje získat nejen hodnotu barevné, ale i radiální teploty (teplota naměřená na jedné vlnové délce).



Obr. 5. Závislost měrného odporu čistého křemíku na teplotě



Obr. 6. Charakteristika fotodiody K1713-08 (InGaAs) při teplotě okolo 25 °C v porovnání s běžným provedením K1713-05/09

povrchu, či dokonce v objemu materiálu je předpokladem dokonalejšího zvládnutí technologie výroby, menšího výmětu a větší výtěžnosti procesu.

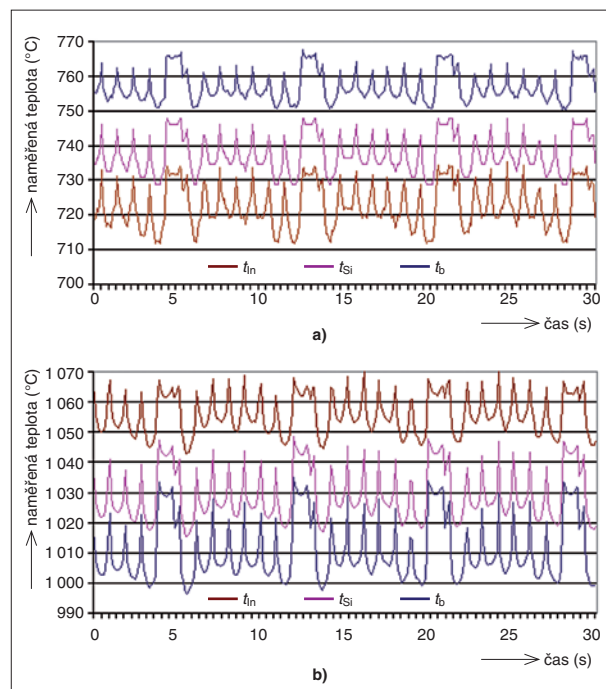
S cílem naměřit pokud možno skutečnou teplotu desky se na základě zkušeností na externím radiálním pyrometru ( $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$ ) nastavuje emisivita povrchu materiálu  $\epsilon = 0,65$ . To znamená, že se předpokládá, že skutečná teplota v reaktoru je asi o 40 °C vyšší než teplota naměřená pyrometrem s emisivitou nastavenou na hodnotu  $\epsilon = 1$ . Ve skutečnosti však tento rozdíl může být ještě větší, protože není přesně známa propustnost okna v křemenném zvonu ani průhledového okna ve dveřích komory reaktoru.

Cílem prvního z provedených experimentů proto bylo zjistit, do jaké míry hodnota tzv. barevné teploty, naměřené poměrovým pyrometrem, tj. měřením na dvou vlnových délkách, bude korespondovat s již uvedenou empirickou emisivitou povrchu křemíku  $\epsilon = 0,65$

Výsledek měření je na obr. 4, kde naměřeným teplotám jednotlivých křemíkových desek odpovídají plošky minim teploty. Maxima teploty odpovídají přechodu mezi kapsami susceptoru, v nichž jsou desky uloženy. Susceptor se šesti křemíkovými deskami umístěnými v měřené zóně (blíže středu) se



Obr. 7. Prototyp dvoupásmového pyrometru systému Si/InGaAs



Obr. 8. Teploty naměřené na zkušebním susceptoru: a) v pásmu okolo 740 °C, b) v pásmu okolo 1030 °C (provozní teplota)

přítom rovnoměrně otáčel rychlostí asi jedné otáčky za 10 s.

Je patrné, že rozdíl mezi barevnou teplotou a radiální teplotou ( $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$ ) při  $\epsilon_1 = 1$  je asi 63 K. To odpovídá efektivní hodnotě emisivity asi 0,6 za předpokladu, že měřený povrch se chová jako šedý, a tedy i naměřená barevná teplota se blíží skutečné teplotě.

Podle vykonaného měření se dvoupásmový pyrometr systému Si/Si jeví jako vhodný ke kontrole a k nastavení radiálních pyrometrů měřících teplotu uvnitř epitaxních reaktorů. Jeho údaj se totiž blíží skutečné teplotě uvnitř reaktoru a nezávisí na propustnosti křemenných skel, skrz která se měří, na tloušťce depozitu křemíku na grafitovém susceptoru, na jeho tepelné vodivosti ani na technologických plynech přítomných v pracovním prostoru zařízení.

### 3. Měření podpovrchové teploty křemíku, zaznamenání odlišné desky na susceptoru a sledování rychlosti a efektivity leptání

Křemík při pokojové teplotě poměrně dobře propouští záření o vlnových délkách od 1 do asi 7  $\mu\text{m}$ . To v principu umožňuje měřit pyrometricky nejen teplotu na povrchu křemíku, ale i teplotu materiálu v určité efektivní hloubce pod jeho povrchem. Avšak s rostoucí teplotou měrný elektrický odpor křemíku, a tím i jeho propustnost, velmi rychle klesá (obr. 5, více o závislosti propustnosti, odrazivosti a emisivity křemíku viz např. [6]).

Naproti tomu je ale tloušťka vrstev křemíku nanášených při epitaxi velmi malá – řádu desítek až stovek mikrometrů. Pokud by tato epitaxní vrstva měla v měřené oblasti nenulovou spektrální propustnost, mohlo by být teoreticky možné zachytit tepelné záření původem ze substrátu křemíkové desky. Pro ověření této hypotézy byl speciálně zhotoven prototyp dvoupásmového pyrometru systému Si/InGaAs s fotodiadou K1713-08 od firmy Hamamatsu na bázi InGaAs se spektrálním pásmem posunutým (rozšířeným) směrem k delším vlnovým délkám (obr. 6).

S ohledem na již zmíněnou dobrou propustnost křemíku v pásmu vlnových

délek mezi 1 a 7  $\mu\text{m}$  by sensor typu InGaAs měl měřit teplotu hlouběji pod povrchem křemíku než sensor na bázi křemíku. Lze tedy očekávat, že bude, alespoň při nižších teplotách, měřit teplotu povrchu vlastní křemíkové desky (substrátu) a povrchu vyhřívaného grafitového susceptoru pokrytého křemíkem (na ploše mezi deskami), která

teplota  $t_{\text{Si}}$  měřená křemíkovým detektorem (při  $\varepsilon = 1$ ) a barevná teplota  $t_b$  byla nižší než obě teploty radiální (obr. 8a).

Při růstu teploty v reaktoru až na teplotu blízkou provozní byl nárůst  $t_{\text{Si}}$  větší než nárůst  $t_{\text{In}}$  a barevná teplota  $t_b$  byla větší než obě radiální teploty a začala se blížit předpokládané skutečné teplotě v reaktoru. Charakter rozložení teplot po ploše susceptoru s různými křemíkovými deskami se však takřka nezměnil (obr. 8b).

Výsledky měření při různých teplotách susceptoru jako by naznačovaly, že při nižších teplotách měří sensor na bázi InGaAs podpovrchovou, a tedy vyšší teplotu. Avšak vzhledem k tomu, že  $t_{\text{In}}$  zjištěná v prázdné (osmé) kapse nepokryté křemíkem je také větší než odpovídající  $t_{\text{Si}}$ , pravděpodobně nejde o měření podpovrchové teploty, ale spíše o důsledek toho, že při měření při různých teplotách susceptoru se také významně měnila efektivní vlnová délka senzoru na bázi InGaAs, a tak došlo k ovlivnění měření.

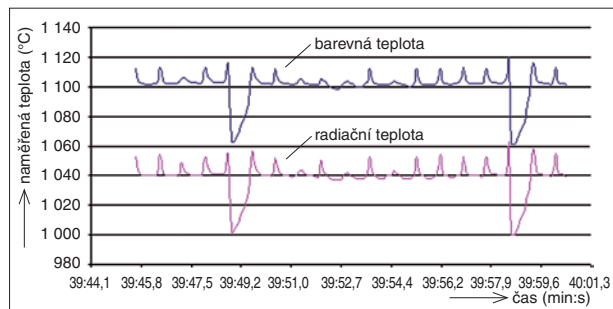
Podpovrchovou, a tedy vyšší teplotu křemíku tudíž při použití fotodetektorů na bázi křemíku a InGaAs zřejmě nelze měřit. Měřit by patrně bylo nutné

na delších vlnových délkách, než jaké byly při tomto experimentu použity, a zřejmě také při ještě nižších teplotách.

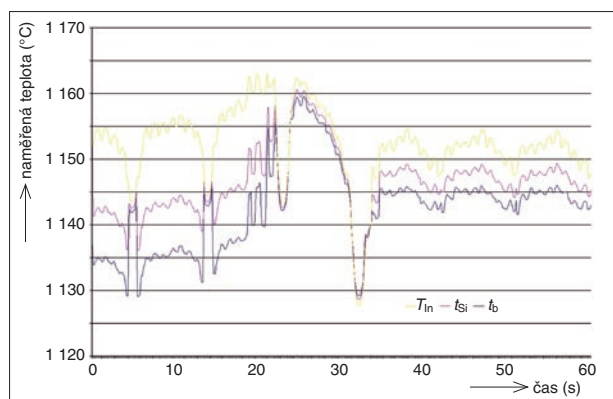
Přes tento neúspěch je z vykonaného měření patrné, že rozdíly mezi teplotami křemíkových desek různých typů jsou větší, než je obvyklé u desek jednoho a téhož typu. To znamená, že v principu lze z údajů pyrometru zjistit přítomnost desky lišící se od ostatních, protože se jinak prohřívá a vyzářuje. Dokladem jsou průběhy teploty na obr. 9, získané při měření teploty horního povrchu susceptoru s dvanácti křemíkovými deskami pyrometrem Marathon MR, kdy byla zcela náhodou zaznamenána deska se špatným kontaktem se susceptorem. Její teplota tudíž byla výrazně jiná než teplota všech ostatních křemíkových desek.

Bezdotykovým měřením teploty lze také celkem dobře sledovat rychlost a efektivitu odleptávání křemíku, deponovaného na povrchu susceptoru, chlorovodíkem (HCl).

Zvlášť dobře je to patrné na příkladu leptání již popsaného zkušebního susceptoru s jednou kapsou nepokrytou křemíkem, uvedeném na obr. 9, kde je v prvních 15 s zachycen teplotní stav susceptoru pokrytého křemíkem. Nepokrytá kapsa má větší emisivitu, a proto se v grafu jeví jako výrazně „teplejší“ než zbytek susceptoru. Asi 15 s po zahájení měření je do komory reaktoru vpuštěn chlorovodík, začíná proces leptání a rozložení teploty na susceptoru se výrazně mění. Po uplynutí asi 34 s od začátku měření je již rozložení teploty na susceptoru v důsledku odleptání velké části vrstvy křemíku stabilizováno a už se dále příliš nemění, přestože proces leptání v reaktoru trvá ještě déle než 20 minut.



Obr. 9. Detekce křemíkové desky se špatným kontaktem se susceptorem



Obr. 10. Proces leptání křemíku na susceptoru chlorovodíkem (počáteční fáze do ustálení teploty)

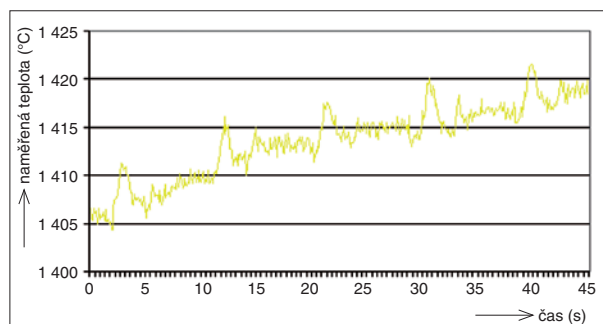
je vyšší než teplota povrchu deponovaného křemíku.

Pro toto měření byl použit již zmíněný prototyp speciálního pyrometru (obr. 5) a současně susceptor s osmi hlavními kapsami a jednou menší, určenou pro vzorky oválného tvaru. Do sedmi z hlavních kapes bylo vloženo vždy po jedné křemíkové desce těchto typů:

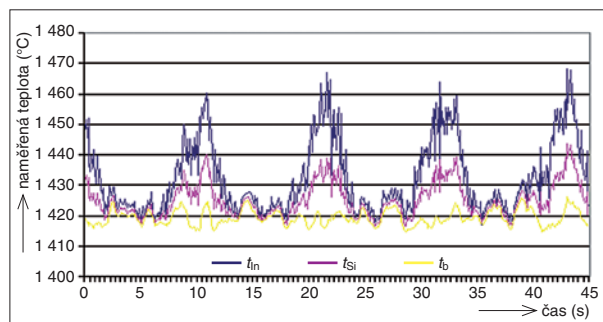
- $\text{N}^+$ (antimon)/N/P (antimonový substrát s vrstvou N a P),
- antimonový substrát,
- $\text{N}^+$ (arsen)/N,
- $\text{N}^+$ (bor)/N,
- borový substrát,
- $\text{N}^+$ (redphos)/N,
- borový substrát.

Zbývající, osmá hlavní kapsa, která díky pokrytí křemíkovou deskou při předchozím procesu zůstala nepokryta křemíkem, zůstala prázdná. Prázdná zůstala i menší oválná kapsa, pokrytá deponovaným křemíkem. Susceptor v uvedeném uspořádání byl postupně zahříván ve vodíkové atmosféře epitaxiálního reaktoru.

Na počátku ohřevu byla teplota  $t_{\text{In}}$  měřená fotodetektorem na bázi InGaAs vyšší než



Obr. 11. Měření barevné teploty  $t_b$  vnitřního povrchu otáčejícího se prázdného kelímku



Obr. 12. Měření teploty taveniny v blízkosti krystalu křemíku

#### 4. Měření teploty uvnitř tažiček krystalu křemíku

Poměrův pyrometr systému Si/InGaAs byl úspěšně použit také v tažičkách krystalu křemíku jak k měření teploty uvnitř kelímku bez taveniny (obr. 11), tak i k měření fluktuací teploty na povrchu taveniny v blízkosti krystalu křemíku, kdy barevná teplota se příliš nemění, ale radiální teploty vykazují velké změny v důsledku otáčení kelímku s taveninou a vlnění povrchu taveniny a jim odpovídajících změn emisivity (obr. 12).

#### 5. Závěr

Dvoupásmový pyrometr systému Si/InGaAs neumožnil zachytit tepelné záření pocházející z podpovrchových vrstev velmi

čistého monokrystalického křemíku, protože optické vlastnosti měřeného materiálu výrazně závisí na teplotě a fyzikální vlastnosti použitých fotodetektorů nedovolují měřit v oblasti teplot pod 500 °C, kde by křemík ještě mohl být pro použití spektrální pásmo opticky propustný.

Poměrový pyrometr systému Si/Si se ukázal být vhodný k měření teploty a studiu vysokoteplotních procesů v epitaxních reaktech i v těžkých monokrystalu křemíku. Současné měření radiační a barevné (poměrové) teploty dává dobrou představu o teplotě i emisivitě měřeného povrchu i o sledovaných teplotních procesech.

#### Poděkování

Práce vznikla v rámci řešení projektů GAČR 102/06/1617 a MSM 0021630529.

#### Literatura:

- [1] DEWITT, D. P. – NUTTER, G. D.: *Theory and Practise of Radiation Thermometry*. A Wiley Interscience publication, USA, 1989.
- [2] [http://jp.hamamatsu.com/resources/products/ssd/pdf/k1713-05\\_etc\\_kird1040e03.pdf](http://jp.hamamatsu.com/resources/products/ssd/pdf/k1713-05_etc_kird1040e03.pdf) [cit. 20. 3. 2008].
- [3] MATĚJKA – BRZOBOHATÝ: *Technologie mikroelektronických obvodů*. Skriptum VUT FEI Brno, 1984.
- [4] SCHMIDT, E. – HUMLÍČEK, J. – LUKEŠ, F. – MUSILOVÁ, J.: *Optické vlastnosti pevných látek*. Univerzita J. E. Purkyně, Brno, 1986.
- [5] ŠIK, J. – HORA, J. – HUMLÍČEK, J.: *Optical functions of silicon at high temperatures*. Journal of Applied Physics, 1998, vol. 84, No. 11.
- [6] SZERUDA, R.: *Měření teploty křemíku v polovodičovém průmyslu*. In: Měření a regulace teplot v teorii a praxi. Ostrava, Tanger, 2005.

- [7] SZERUDA, R.: *Problematika bezdotykového měření teploty skla*. Sklář a keramik, 9-10/1999.

Mgr. Rostislav Szeruda,  
ON Semiconductor Czech Republic, s. r. o.,  
právní nástupce (do 31. 1. 2007)  
(rostislav.szeruda@seznam.cz),

Ing. Miroslav Krupa,  
ústav automatizační a měřicí techniky,  
Fakulta elektrotechniky a komunikačních  
technologií VUT v Brně  
(miroslav.krupa@phd.feec.vutbr.cz)

Lektoroval:  
prof. Ing. Stanislav Ďaďo, DrSc.

# Architektúra SOA, Ajax a webové služby

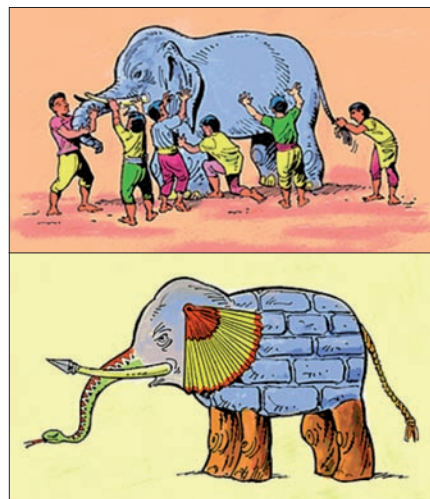
Pavel Horovčák

Predmetom článku je stručná charakteristika novej metódy asynchrónnej komunikácie medzi klientom a serverom Ajax v spojení s webovou službou WS (*Web Services*). V rámci nastupujúcej architektúry SOA (*Service Oriented Architecture*) majú obe svoje miesto a ich spojením vznikajú nové možnosti diaľkového monitorovania procesov. Podpora tvorby a využívania webových služieb je už súčasťou aktuálnych vývojových prostredí. Popri štandardných prostrediach spojených so vznikom WS (Java, .NET) je v súčasnosti takáto podpora realizovaná aj vo veľmi rozšírenom prostredí pre tvorbu webových úloh PHP.

## 1. Architektúra SOA

SOA (*Service Oriented Architecture*) je dnes veľmi častým (až zaužívaným) pojmom, veľa ráz žiaľ používaným aj v nesprávnych súvislostiach. Medzi hlavné charakteristiky SOA patrí voľná viazanosť služieb, asynchrónna komunikácia medzi službami, ich znovupoužitelnosť, „hrubozrné“ aplikačné rozhranie API služieb, využívanie odborových štandardov a ukladanie metadát v úložisku. SOA teda nie je konkrétny produkt, firma ani technológia, a už vôbec nie odborový štandard. Marketing niektorých výrobcov sa snaží takúto zdanie vyvolať, čím vytvára zo SOA len ďalšie zaklínadlo (TLA, *Three Letter Acronym, buzzword*) [9]. Za konkrétne implementácie SOA sú pokladané

dve „technológie“ v súčasnosti dominantné – webové služby (WS) a podnikové zbernice služieb (ESB – *Enterprise Service Bus*). SOA je výsledkom evolúcie predchádzajúcich distribuovaných architektúr, ako napr. RPC (*Remote Procedure Call*), DCOM (*Dis-*



Obr. 1. Slepí muži a slon (John Godfrey Saxe) [7]

tributed Component Object Model) a CORBA (*Common Object Request Broker Architecture*). Definíciou SOA je veľa, napr. „široko akceptovaný prístup pre vývoj, prevádzku a integráciu podnikových aplikácií založený na zdieľaných distribuovaných službách“ [10] alebo „voľne viazaná architektúra na-

vrhnutá pre podnikateľské potreby organizácie“ [3]. O rôznosti názorov na SOA veľmi výrečne svedčia rôzne skutočnosti – napr. podľa [10] „desať dodávateľov softvéru poskytnú minimálne dvanásť definícií“, podľa iného autora [2] definíciu SOA možno porovnať k básni Johna Godfreya Saxe o šiestich slepých mužoch a slonovi (obr. 1 prevzatý z [6]); každý z nich popisuje slona trochu ináč, lebo každý je ovplyvnený vlastnou individuálnou skúsenosťou, napr. muž dotýkajúci sa choboty si myslí, že je to had, podobne sloní kel pripomína inému šíp atď.). Tato skutočnosť je niekedy označovaná ako „slon SOA“ (*The SOA Elephant*). Známeho Saxeovho slona je možné predstaviť si, a teda aj popísať, lebo je to fyzická entita, zatiaľ čo špecifikovať SOA je oveľa ťažšie, pretože koncepcie systémov nie sú dostupné v ich fyzickej manifestácii [2]. Porovnanie nesprávnych predstáv (mýtov) často spojených so SOA a skutočností podľa [3] môže bližšie osvetliť ciele SOA skôr, ako bude prístupné k implementácii riešenia (tab. 1). Je potrebné zdôrazniť, že SOA nie je cieľom, ale prostriedkom, ktorého efektívnosť sa prejaví najmä v dlhšom období.

Medzi najčastejšie opakované chyby pri zavádzaní SOA (podľa spoločnosti Gartner [6]) patrí napr.:

- zavedenie SOA pred dokončením výkonných celkov, čo vedie k veľkému množstvu služieb (servisov) nekorešpondujúcich s obchodným modelom a vynucujúcich si časté zmeny špecifikácie,