

Peter Lobotka; Eva Majková; Ivo Vávra; Štefan Luby
Kovové supermriežky

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 37 (1992), No. 2, 95--113

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137894>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1992

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

- [8] SHUMAN F. G., HOVERMALE J. B.: *An Operational Six-Layer Primitive Equation Model*. Journal of Applied Met. Vol. 7 (1968), No 4.
- [9] ŠKODA a kol.: *Automatizovaná předpovědní linka ČHMU*. Sborník prací Českého hydro-meteorologického ústavu 38 (1990).
- [10] BAŤKA M.: *The CHMI Limited-Area Operational Forecast Model*. Studia Geoph. et Geod. 1991.

Kovové supermriežky

Peter Lobotka, Eva Majková, Ivo Vávra, Štefan Luby, Bratislava

1. Úvod

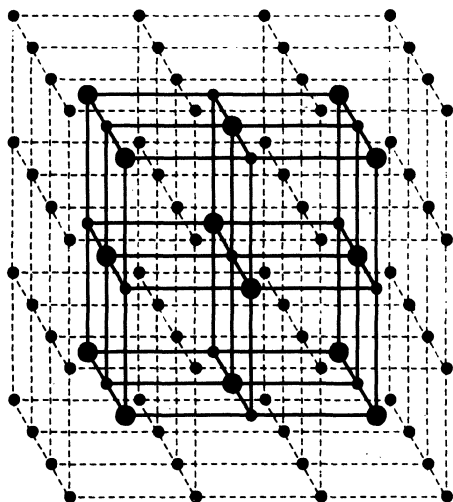
Korene dnes rozvetveného výskumu polovodičových aj kovových supermriežok siahajú do rokov 1969–70. Pôvod majú v prácach Esakiho et al. [1,2], ktorí skúmali polovodičové štruktúry. Sami za objaviteľov supermriežok označujú Johanssona a Lindeho, a to na základe ich práce o metalurgii zliatiny CuAu [3]. V tejto zliatine sa okrem základnej symetrie kryštálovej mriežky pozorovala ďalšia, doplnková periodicitá usporiadania, ktorej perióda je niekoľkokrát väčšia ako základný mriežkový parameter. Podobná doplnková periodicitá sa pozorovala aj v zliatine Fe₃Al (obr. 1). Iná, ešte skoršia práca z tejto oblasti pochádza od Tammana [4]. Prvé kovové supermriežky, zložené z periodicky sa striedajúcich kovových vrstiev, pripravili Du Mond a Youtz v r. 1940 [5].

Esaki sa sprvu zaoberal transversálnym transportom v polovodičových supermriežkach a chcel zhotoviť súčiastky so záporným diferenciálnym odporom. Bola to extrapolácia jeho výskumu tunelových diód. Prvé úspechy zaznamenal v r. 1972 [6]. V týchto pionierskych dobách sa v technológii tenkých vrstiev za supermriežku pokladala multivrstva zložená zo striedajúcich sa vrstiev s prispôbenými mriežkovými konštantami, teda de facto epitaxná štruktúra. (Viď jednu z prvých čs. review [7].)

V priebehu ďalšieho vývoja a rozširovania odboru sa definícia tenkovrstvovej supermriežky zovšeobecňovala a začala sa ňou rozumieť periodická multivrstva striedajúcich sa tenkých vrstiev bez bližšieho predpokladu o ich kryštalickej štruktúre (cf. [8]).

Ing. PETER LOBOTKA, CSc. (1950), a ing. IVO VÁVRA, CSc. (1949), jsou vědeckými pracovníky Elektrotechnického ústavu SAV, Dúbravská cesta 9, 842 39 Bratislava.

RNDr. EVA MAJKOVÁ, CSc. (1950), a ing. Štefan Luby, DrSc. (1941) jsou vědeckými pracovníky Fyzikálního ústavu SAV, Dúbravská cesta 9, 842 28 Bratislava.



Obr. 1. Trojrozmerná supermriežka zliatiny Fe_3Al : ● Al, ● Fe. Stredy elementárnych buniek Fe matrice sú striedavo obsadené atómami Al a Fe.

Výskumný sortiment sa rozšíril na supermriežky kombinujúce rôzne materiály, napr. kov/polovodič, kov/oxid, oxid/oxid [9].

Supermriežky teda postupne obsiahli nielen kryštalické, ale aj amorfné materiály. V tomto širšom zmysle bude termín supermriežka používaný aj v našom príspevku. Jednotný názor na pomenovanie však zatiaľ neexistuje.

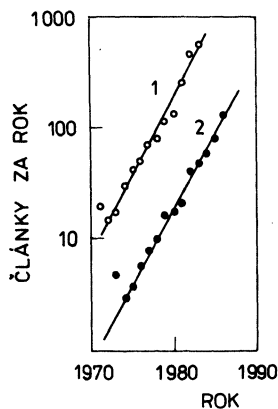
Supermriežky sú súčasťou koncepcie prípravy nových typov materiálov, aké sa v prírode nevyskytujú. Tento trend sa rozvinul najmä v období po II. svetovej vojne. Niekedy sa hovorí o výskume druhej prírody. Príbuzné supermriežkam sú látky zhotovené interkaláciou, ktoré vznikajú zabudovaním cudzích atómov a molekúl medzi jednotlivé roviny atómov materskej látky (napr. grafitu) [10].

Moderný rozvoj kovových supermriežok spadá do 80. rokov. Primárny popud ich prípravy pochádzal zo štúdia chemickej difúzie, resp. interdifúzie [9]. Metódou poklesu rtg difrakčných maxím pri rozdifundovaní štruktúry môžeme v supermriežke merať extrémne nízke hodnoty difúzných koeficientov — na úrovni $10^{-27} \text{ m}^2/\text{s}$, čo zodpovedá pri čase žihania 10^6 s okolo 0,2 preskoku na atóm. Obvyklé metódy opierajúce sa o snímanie koncentračných profilov technikami, ako je Augerova elektrónová spektroskopia (AES) alebo Rutherfordov spätný rozptyl (RBS) vyžadujú v priemere 200 preskov na atóm [11]. Kovové supermriežky sú tiež východiskom v príprave amorfných materiálov z kryštalických komponent amorfizačnou reakciou v tuhej fáze (napr. [12]).

Na druhej strane si treba priznať, že v blízkej budúcnosti rozhodujúcou oblasťou komerčnej realizácie budú zrejme polovodičové supermriežky. Predzvestou je objav kvantového Hallovhovho javu, výskum nových elektronických súčiastok založených na rezonančnom tunelovaní, fotodetektory využívajúce kvantové javy a ďalšie potenciálne aplikácie [13].

Kovové supermriežky sú dnes vďaka pokročilej vákuovej depozičnej technike poľom, ktoré sľubuje nové efekty v mnohých oblastiach, v ktorých sú hlavnými nositeľmi aplikácií kovové materiály a využívajú sa elektrické, magnetické a mechanické vlastnosti a javy vrátane supravodivosti. Môže pritom ísť o kombináciu vlastností známych z ob-

jemových materiálov s malým vplyvom rozhraní, resp. o nové vlastnosti multivrstiev s dominujúcim vplyvom rozhraní a interakcií medzi vrstvami. Nové poznatky možno hľadať predovšetkým tam, kde dĺžková charakteristika javu (napr. koherenčná dĺžka, stredná voľná dráha) je väčšia alebo porovnateľná s hrúbkou vrstiev supermriežky.



Obr. 2. Počet článkov týkajúcich sa štruktúr pripravených epitaxiou z molekulárneho zväzku — prevažne polovodičových (1) a kovových multivrstiev a supermriežok (2) — podľa [14].

Pomer pozornosti venovanej polovodičovým a kovovým supermriežkam dokumentuje obr. 2. Súvisí zaručene aj s tým, že dokonalé kovové kryštály sa pestujú obťažnejšie ako kryštály polovodičové, v dôsledku absencie pevnej kovalentnej väzby v kovoch. Na druhej strane mnohé fyzikálne vlastnosti kovov, využívané v praxi, nie sú nižším stupňom ich chemickej a štruktúrnej dokonalosti výrazne ovplyvnené. Polovodiče sú takýmito poruchami spravidla už degradované. Z praktického hľadiska nie je preto zhotovenie dokonalej kryštalickej štruktúry u kovových vrstiev natoľko podmieňujúce ako u vrstiev polovodičových [14].

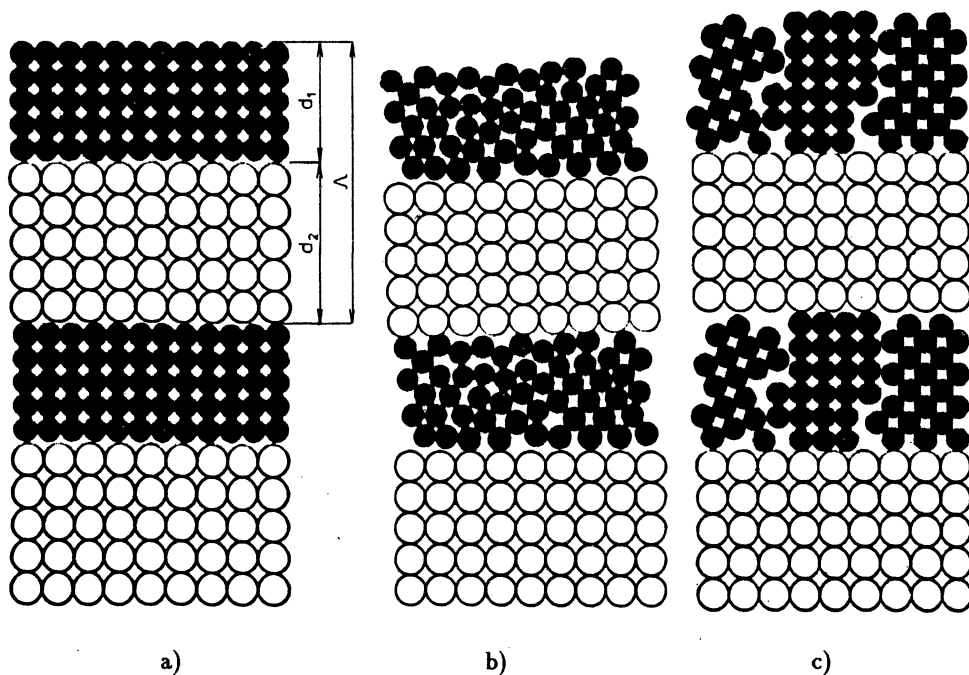
2. Klasifikácia supermriežok

Supermriežku tvoria najčastejšie striedajúce sa vrstvy dvoch materiálov A, B (prvkov, zlučenín, zliatin) s hrúbkami d_1 , d_2 . Periódou supermriežky nazývame veličinu Λ ,

$$\Lambda = d_1 + d_2.$$

Niekedy sa jej hovorí aj perióda modulácie (zloženia, kryštalickej štruktúry). Ďalším parametrom charakterizujúcim supermriežku je počet periód N , dosahujúci niekedy až ~ 100 . Hrúbka vrstiev býva v rozmedzí od jednej atómovej roviny do niekoľko desiatok nm.

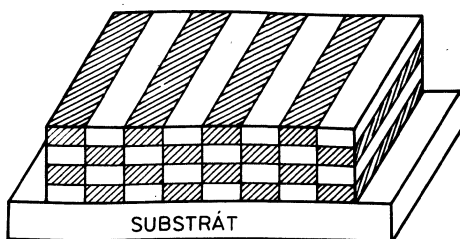
V závislosti od kryštalickej štruktúry vrstiev sú možné rozličné typy supermriežok. Niektoré sú znázornené na obr. 3. Okrem prípadov na obr. 3 možno vytvárať aj iné kombinácie, napr. supermriežky zložené z dvoch typov amorfných vrstiev, z amorfnej a polykryštalickej vrstvy a p. Záujem sa môže postupne rozšíriť na supermriežky vytvorené opakovaním troch i viacerých materiálov ($\Lambda = d_1 + d_2 + d_3 + \dots$).



Obr. 3. Supermriežka

- a) zložená z monokryštalických vrstiev,
 - b) zložená z amorfných a monokryštalických vrstiev,
 - c) zložená z polykryštalických a monokryštalických vrstiev;
- d_1 a d_2 sú hrúbky jednotlivých vrstiev, Λ je perióda supermriežky.

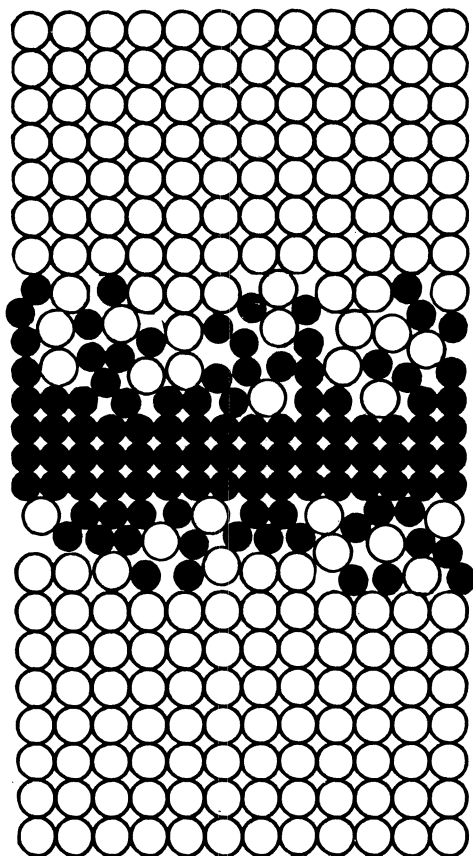
Okrem periodických multivrstvových štruktúr sa skúmajú i kváziperiodické multivrstvy. Známa je Fibonacciho postupnosť vytvárania kváziperiodicity, v ktorej každý nasledujúci sloj pozostáva z dvoch predošlých atď. [15]. Skúmali sa aj fraktálne geometrie [16]. Popri jednorozmerných supermriežkach (periodicita v jednom smere) možno si predstaviť vytvorenie dvojrozmerných i trojrozmerných periodicít, k čomu by bolo potrebné využiť metódy litografie (obr. 4). Možno samozrejme zhotoviť i supermriežky s dvomi (Λ_1, Λ_2) alebo viacerými striedajúcimi sa periódami [17]. Väčšina týchto úvah a prác má zatiaľ čiste bádateľský charakter.



Obr. 4. Supermriežka s dvojrozmernou perióditou.

Na úplný fyzikálny opis supermriežky je nutné poznať ich chemické a štruktúrne usporiadanie. Pokiaľ sú rozhrania jednotlivých vrstiev ostré a hladké a hrúbky vrstiev sú dodržané s dostatočnou presnosťou, hovoríme o chemicky usporiadanej supermriežke. Ak sú jednotlivé vrstvy aj monokryštalické, je supermriežka usporiadaná aj štruktúrne.

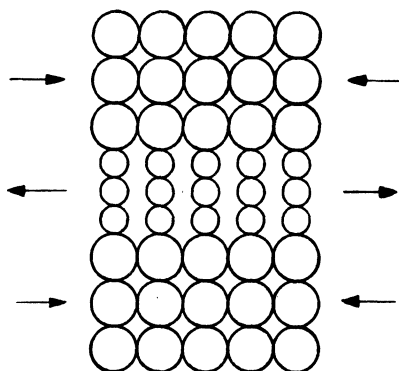
Za ideálne možno považovať atomárne hladké rozhranie. Spravidla sa dosahuje u epitaxných supermriežok, ktoré majú zároveň dlhodobú štruktúrne koherenciu (naprieč celej multivrstvy). Podmienky prípravy epitaxných supermriežok vyžadujú však zvýšenú teplotu substrátu, ktorá zvyčajne vyvolá neželateľné difúzne premiešanie oboch materiálov; výsledkom toho môže byť rozhranie, ktorého hrúbka je porovnateľná s hrúbkou samotných vrstiev (obr. 5).



Obr. 5. Supermriežka zložená z monokryštalických vrstiev s rozdifundovanými rozhraniami.

Takéto rozhrania bývajú často štruktúrne neusporiadané a môžu významne ovplyvniť fyzikálne vlastnosti supermriežky. Je potrebné upozorniť, že šírky po sebe nasledujúcich rozhraní sa spravidla líšia, ako je to znázornené na obr. 5. Je to spôsobené tým, že sa nanášajú atómy dvoch rozličných hmotností s nerovnakou energiou dopadu.

Do kategórie epitaxných supermriežok patria aj napäté supermriežky, ktoré vznikajú kombináciou materiálov s rozličnými mriežkovými parametrami. Nesúlad môže byť až niekoľko percent. Štruktúrna koherencia sa dosiahne tým, že v jednej vrstve vznikne tlak a v druhej ťah. Tento efekt zaniká, pokiaľ hrúbky vrstiev presiahnu 3–5 atómových rovín. Takéto objekty neobsahujú žiadne dislokácie (obr. 6). Dôležité je, aby stredná mriežková konštanta supermriežky bola prispôsobená substrátu [18].



Obr. 6. Napätá supermriežka.

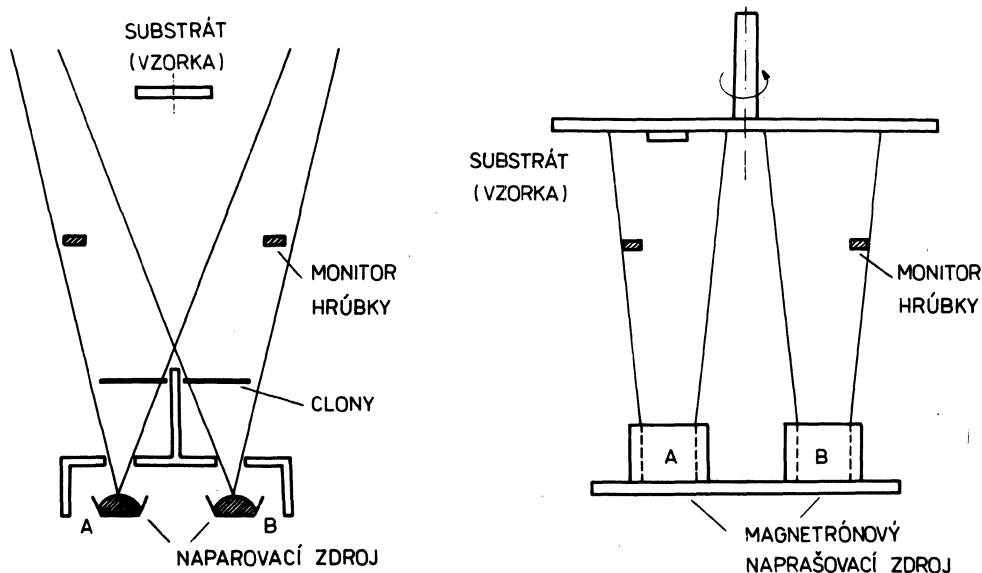
3. Príprava a charakterizácia supermriežok

Supermriežky sa pripravujú niektorým zo spôsobov atomárnej depozície. Ide o napaarovanie alebo napašovanie, chemickú depozíciu z pár alebo aj elektrolytickú depozíciu. Najdokonalejšou metódou je epitaxia z molekulárneho zväzku (MBE), ktorou sa dajú pripraviť kvalitné supermriežky. Vzhľadom na vysokú cenu zariadenia sa zatiaľ používa zriedka. Experimentátori sa pritom orientujú na zariadenia zavedené v technológii kremíka, ktoré umožňujú používať vyššie teploty podložky a ako zdroj atomárnych (molekulárnych) zväzkov majú elektrónové odparovače, vhodné aj na depozíciu kovov s vysokou teplotou tavenia. Dnes najfrekvencovanejšie MBE aparátúry, v ktorých sa ako zdroje pár používajú Knudsenove cely, určené pre technológiu GaAs a ďalších binárnych viacložkových polovodičov, nie sú pre oblasť depozície ťažšie tavitelných kovov vhodné. Najčastejšie sa zatiaľ na prípravu kovových supermriežok používa napaarovanie v ultravysokom vákuu a napašovanie (obr. 7). Rýchlosti depozície sú nízke, 0,01–0,05 nms^{-1} . Pri nízkej rýchlosti depozície hrozí kontaminácia vrstiev atómami zbytkovej atmosféry, preto sa napaaruje vo vákuu lepšom ako 10^{-7} Pa. Pri napašovaní sa môžu do rastúcej vrstvy chemicky viazať nečistoty z pracovného plynu (argónu). Preto sa používa argón vysokej východiskovej čistoty, prípadne sa v getrovacích predkomorách aparátúry ešte čistí. Ako je známe [19], aj atómy Ar sa môžu do rastúcej vrstvy zabudovať. Hoci Ar nie je vo vrstvách chemicky viazaný, jeho prítomnosť ovplyvňuje ich kryštalickú štruktúru a kvalitu rozhraní. Koncentráciu Ar vo vrstvách možno znížiť zvýšením teploty substrátu.

Teplota substrátu je dôležitým parametrom depozície. Kladú sa na ňu protikladné požiadavky. Ak sa žiada ostré rozhranie, musí byť dostatočne nízka, aby sa zabránilo interdifúzii komponent. Na druhej strane musí byť dostatočne vysoká, ak sa vyžaduje epitaxný rast jednotlivých vrstiev.

Tu je účelné spomenúť zaujímavú analýzu Flynna [20], ktorý ukázal, že teplotné „okno“ optimálnych rastových podmienok je veľmi úzke, zhruba $0,35-0,4 T_m$ (T_m — teplota tavenia materiálu). Z toho zároveň vyplýva, že kvalitné epitaxné supermriežky sa dajú získať najmä vtedy, ak majú jednotlivé komponenty blízke teploty tavenia.

Na druhej strane nie vždy sa vyžadujú vrstvy monokryštalické. Pokiaľ je cieľom pripraviť vrstvy polykryštalické alebo amorfné, môže sa deponovať na chladený substrát (napr. pri 220 K alebo 77 K). Tu samozrejme hrozí zvýšená kontaminácia vrstiev getrovaním nečistôt z prostredia.



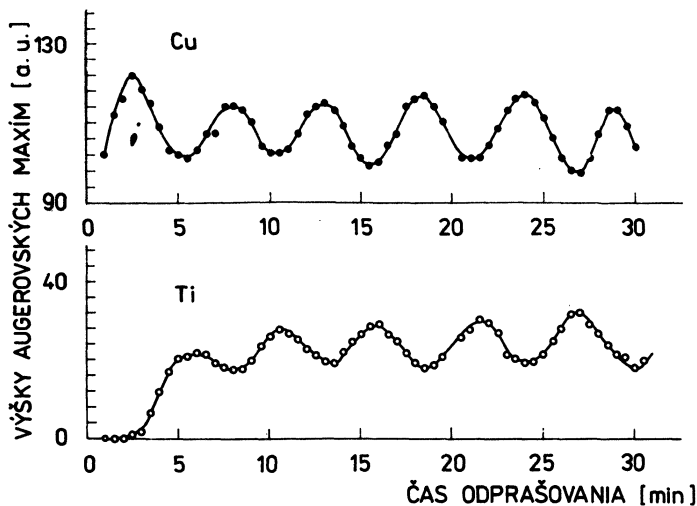
Obr. 7. Schéma zariadenia na prípravu supermriežok:

- a) naparovaním,
- b) magnetronovým naprašovaním.

Striedavá depozícia vrstiev sa dosiahne striedavo sa otvárajúcimi clonami (naparovanie, obr. 7). Presnosť a kontrola procesu sa niekedy zabezpečuje počítačom. Naparovaním aj naprašovaním možno pripraviť epitaxné aj amorfné kovové supermriežky. Výhodou naprašovania je možnosť prípravy supermriežok zložených z viackomponentných materiálov, ako sú zliatiny alebo zlúčeniny.

Medzi metódy charakterizácie supermriežok patria rtg difrakcia, AES, RBS, transmisná elektrónová mikroskopia (TEM) a i. V špeciálnom prípade je možné použiť aj ďalšie metódy, napr. Mössbauerovu spektroskopiu, feromagnetickú rezonanciu, jadrovú magnetickú rezonanciu, fotoemisné merania a i.

Hĺbkové rozlíšenie AES a RBS obmedzuje použitie týchto metód pre supermriežky s vrstvami hrubšími ako 2 nm [21]. AES je použiteľná pre prvky s atómovým číslom $Z \geq 3$. RBS je použiteľná pre prvky so $Z \geq 10$, (ľahké prvky majú malý účinný prierez rozptylu), nerozliší však dva prvky podobnej hmotnosti, najmä ak sú hmotnosti väčšie. Skutočný koncentračný profil je vždy skreslený rozlišovacou schopnosťou experimentálneho zariadenia. S použitím AES a RBS sa dá dosiahnuť veľmi dobré rozlíšenie ~ 10 nm pri sledovaní relatívnych zmien koncentračných profilov na rozhraniach jednotlivých vrstiev, napr. v dôsledku vzájomnej difúzie. Vyhodnotenie absolútnej ostrosti rozhrania je zaťažené väčšou chybou, pretože koncentračný profil sa získava dekonvolúciou [22].

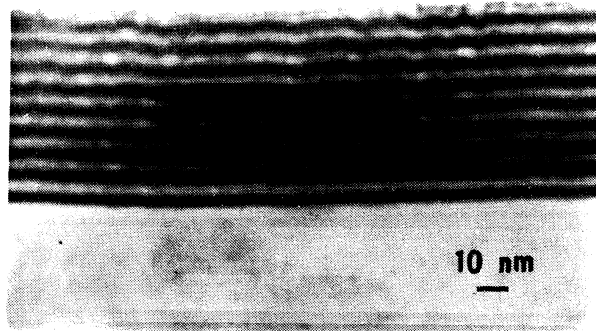


Obr. 8. AES hĺbkový profil komponent v supermriežke Cu/Ti zloženej zo 6 dvojrvtiev (meraný v spolupráci autorov a EF SVŠT).

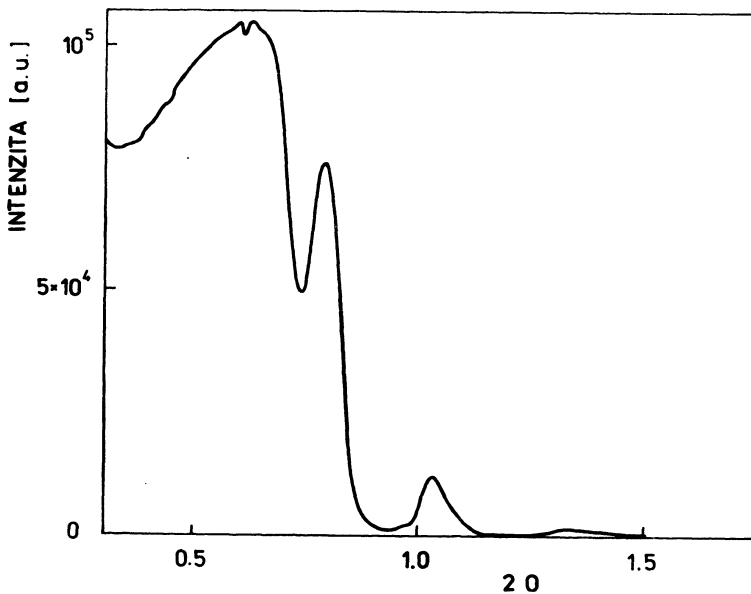
Na obr. 8 je AES hĺbkový koncentračný profil Cu a Ti v supermriežke Cu/Ti so 6 dvojrvtvami. Pomocou TEM sa vyšetruje štruktúrne usporiadanie supermriežok v priečnom reze (CS-TEM). Umožňuje kontrolu periodicity a hladkosti rozhraní jednotlivých vrstiev. Vzorky pre CS-TEM je možné pripraviť mikrotómom [23], metódou mikrozrezu podľa Lepetra [24] (spravidla len systémy kov-polokov). Najčastejšie sa používa niektorá z modifikácií metódy Shenga et al. [25], čo je séria technologických operácií, pozostávajúca zo zalievania, mechanického leštenia a iónového leptania preparátu. Na obr. 9 je CS-TEM supermriežky Cu a Ti, pripravený poslednou zo spomínaných metód.

Rtg difrakciou v oblasti malých uhlov je možné určiť veľmi presne periódu chemického usporiadania a kontrolovať ostrosť rozhraní. Je to oblasť uhlov, ktorá korešponduje technologicky realizovateľným periódam kompozícií supermriežok. Prejavuje sa tu zároveň totálna reflexia rtg žiarenia. Výsledný difraktogram je superpozíciou dvoch príspevkov, ktorými sú [26]:

- a) braggovská difrakcia od supermriežky, z ktorej sa určí jej perióda (pričom jednotlivé dvojrvtvy sú ekvivalentom braggovských rovín);



Obr. 9. Priechny rez TEM supermriežky W/Si pripravený naparovaním vo vákuu (ÚFE SAV).



Obr. 10. Rtg difrakcia od supermriežky Cu/Ti v oblasti uhlov $2\theta \leq 2^\circ$ (merané vo FÚ SAV). Maximá odpovedajú perióde $\Lambda = 31$ nm; maximá odpovedajúce celkovej hrúbke multivrstvy nie sú viditeľné.

- b) interferencia žiarenia odrazeného na rozhraniach okolitého prostredia — napr. vzduch/supermriežka a supermriežka/substrát, ktorá umožňuje určiť celkovú hrúbku supermriežky.

Príklad rŕg difraktogramu supermriežky je na obr. 10. Hoci teória difrakcie pri periodickej variácii atómových rozptylových faktorov pochádza zo štyridsiatych rokov [27], experimentálne sa konfrontuje hlavne v súčasnej dobe (napr. [28]). Pre charakterizáciu supermriežok nie sú dôležité iba difraktogramy pri malých uhloch, ale aj charakteristické braggovské reflexie, odpovedajúce kryštalickej štruktúre jednotlivých vrstiev, získané pri veľkých difrakčných uhloch. Pri sinusovej modulácii kompozície supermriežky má braggovská reflexia po oboch stranách satelitné maximá, odpovedajúce difrakčnému vektoru

$$S = \frac{n}{a} \pm \frac{1}{\Lambda},$$

kde n je celé číslo, a – príslušný mriežkový parameter. V reálnych supermriežkach je modulácia zložitejšia. Jej priebeh treba vyjadriť pomocou Fourierovho radu a vyšším harmonickým odpovedajú ďalšie páry satelitných maxím.

4. Fyzikálne vlastnosti kovových supermriežok

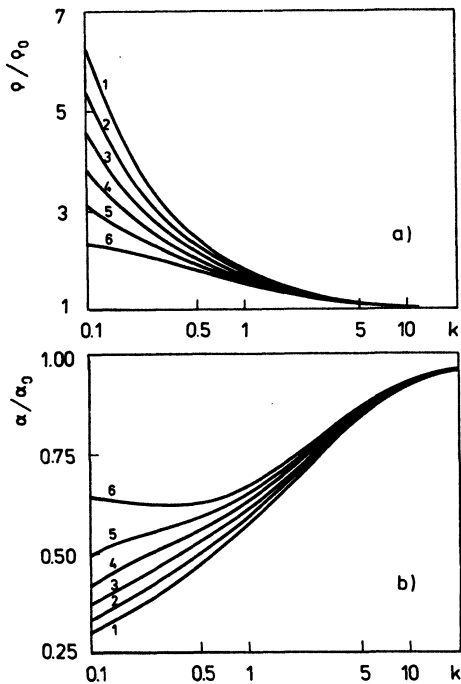
Pre fyzikálny výskum sú kovové supermriežky zaujímavé predovšetkým v dvoch oblastiach:

- i) Štúdium nových materiálov. Kombináciami kov-kov alebo kov-polokov je možné pripravovať nové „umelé“ materiály so zaujímavými kombináciami mechanických, elektrických a magnetických vlastností.
- ii) Štúdium difúzných procesov na rozhraniach a interakcií medzi vrstvami rovnakého a nerovnakého typu.

Ak hrúbka jednotlivých vrstiev je ~ 10 nm, začínajú sa popri vlastnostiach individuálnych vrstiev uplatňovať rozmerové javy, efekty blízkosti a vzájomná interakcia vrstiev a tieto efekty výrazne ovplyvňujú výsledné vlastnosti supermriežky.

a) Elektrónový transport

Elektrónové transportné vlastnosti kryštalických kovových supermriežok sa dajú opísať v rámci Boltzmannovej kinetickej teórie. Teóriu aplikovateľnú pre kryštalické kovové supermriežky rozpracoval Dimmich [29]. Vychádza z toho, že najvýznamnejšími rozptylovými centrami elektrónov sú hranice zŕn polykryštálu a rozhrania supermriežky. Na opis rozptylu elektrónov na hraničiacich zŕn prebral Mayadas-Shatzkesovu teóriu, ktorá pracuje s tzv. parametrom reflexie hranice zrna R . Je to pravdepodobnosť, že sa elektrón po náraze na hranicu zrkadlovo odrazí. Vplyv rozhraní supermriežky sa opisuje transmisným parametrom p , zavedeným Carciom a Sunom [30], čo je pravdepodobnosť prechodu elektrónu rozhraním susediacich vrstiev. Dimmich navyše zohľadňuje aj rôznosť transportných parametrov v susedných vrstvách. Zo spomínanej práce sú prevzaté závislosti merného odporu ρ a teplotného koeficientu odporu α na pomere $k = \Lambda/\lambda_e$, kde λ_e je stredná voľná dráha elektrónu (obr. 11, 12). Súlad teórie s experimentom uvádza napr. Kaneko et al. [31].



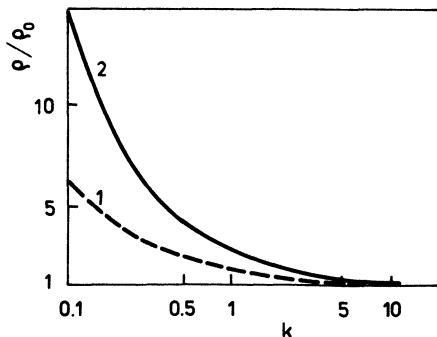
Obr. 11. Závislosť ρ/ρ_0 (a) a α/α_0 (b) modelovej epitaxnej supermriežky na pomere $k = \Lambda/\lambda_e$.

ρ je meraný odpor supermriežky, ρ_0 je stredná hodnota merného odporu určená z hodnôt merného odporu jednotlivých vrstiev bez vplyvu rozmerových efektov;

α a α_0 sú určené rovnakým spôsobom.

Pre jednoduchosť sa uvažuje rovnaká hrúbka vrstiev $d_1 = d_2$, rovnaké efektívne hmotnosti elektrónu $m_1^* = m_2^*$ a rovnaké hodnoty parametra $p_1 = p_2$, pričom p_1 (p_2) je pravdepodobnosť prechodu elektrónu z vrstvy 1 do vrstvy 2 (a naopak).

Pre krivky 1 až 6 rastie p od 0 do 1 s prírastkom 0,2 [29].



Obr. 12. Závislosť ρ/ρ_0 pre pomer $k = \Lambda/\lambda_e$ pre monokrystalickú supermriežku, kde $p = 0$ (1), a pre polykrystalickú supermriežku, kde $p = 0$, $R = 0,3$, pričom stredná veľkosť zrna je rovná hrúbke vrstvy (2).

Ostatné podmienky sú ako v obr. 10 [29].

V praxi pri izbovej teplote sa hodnoty pomeru k pohybujú v intervale 0,1–0,5, v ktorom prvá derivácia závislostí $\rho(k)$, $\alpha(k)$ je veľká. Preto meranie odporu a α sa dá využívať na detekciu zmien na rozhraniach supermriežky napr. počas ich tepelného spracovania [32].

V oblasti elektrónového transportu v supermriežkach sa pozorovali aj zaujímavé javy poklesu α pri klesajúcom Λ takmer na nulu, ktorý možno interpretovať v rámci vyššie uvedených teórií [30]. Pozorovala sa aj gigantická magnetorezistencia v supermriežke Fe/Cr, využitelná v senzéroch [33] a i.

b) Magnetické vlastnosti kovových supermriežok

Najväčší počet prác z oblasti kovových supermriežok je venovaný výskumu magnetizmu. Pri vytváraní supermriežok sa kombinujú kovy magnetické s nemagnetickými, feromagnetické s antiferomagnetickými a podobne. Magnetické usporiadanie sa zachováva až do úrovne monoatomárnych vrstiev [34] a nové zaujímavé javy sa preto prejavujú až pri hrúbkach magnetických vrstiev okolo desiatín nm. Z toho dôvodu je príprava vzoriek náročná. Jednou zo základných otázok v magnetických supermriežkach je pôvod výmennej väzby medzi vrstvami rovnakého typu naprieč medzivrstvou [35]. V supermriežkach obsahujúcich kovy vzácnych zemín je táto väzba vysvetľovaná analógiou RKKY mechanizmu [36]. Medzivrstvová výmenná väzba sa pozorovala aj v supermriežkach tranzitívnych kovov. Zatiaľ neobjasnená je silná antiferomagnetická väzba medzi Fe vrstvami v Fe/Cr supermriežkach [33]. K zaujímavým možno zaradiť prácu [37], kde sa zistilo zachovanie feromagnetizmu Fe v supermriežke Fe/Mg dokonca pri hrúbke vrstvy Fe $\sim 0,2$ nm, zvýšenie hustoty magnetizácie prepočítanej na objem Ni v supermriežke Pd/Ni voči čistému Ni [38] a rad prác venovaných príprave supermriežok s kolmou magnetickou anizotropiou (Co/Cr [39], Tb/Fe [40]). Veľká jednoosá anizotropia môže súvisieť s väzbami usporiadanými kolmo na rozhranie vrstiev. Potenciálne je využitie takýchto štruktúr v pamäťových médiách.

c) Supravodivosť v kovových supermriežkach

Supermriežky sú vďačným objektom výskumu bádateľov v supravodivosti, ktorí tradične inklinujú k hľadaniu nových materiálov. Okrem toho nie sú tu tie experimentálne problémy ako v prípade magnetizmu, pretože charakteristická dĺžková škála supravodivosti (koherenčná dĺžka) je v porovnaní s charakteristikou iných javov väčšia a aj v prípade väčších períod Λ sa zisťujú nové javy.

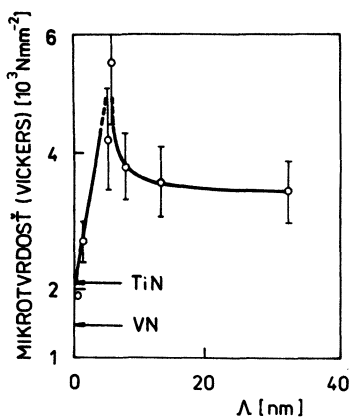
Pri skúmaní supravodivosti sa zvyčajne kombinuje supravodivý kov s nesupravodivým materiálom (kovom, polovodičom, izolantom). Záujem sa sústreďuje najmä na skúmanie prechodu z troj – do dvojdimenzionálneho transportu ($3D \rightarrow 2D$). Využíva sa pritom skutočnosť, že koherenčná dĺžka ξ závisí nepriamo úmerne od teploty. Ak teda pri vyššej teplote, kde hrúbka supravodivej vrstvy $h > \xi$, bude mať supermriežka 3D vlastnosti, pri ochladení nastane stav $h < \xi$ a vzniknú podmienky pre 2D režim. Rozmer transportu sa dá zistiť z merania teplotnej závislosti horného kritického poľa H_{c2} [16].

Pri hľadaní nových materiálov pozornosť vzbudil poznatok, že supermriežka Au/Ge je supravodivá ($T_c = 2,02$ K), hoci ani jedna jej zložka medzi supravodiče nepatrí. Vysvetlenie treba hľadať na rozhraniach týchto materiálov [41]. Rad prác sa orientoval na štúdium interakcie feromagnetika a supravodiča s nasledujúcim potláčaním supravodivosti (napr. supermriežka V/Fe) [16].

V súvislosti s objavom vysokoteplotných oxidových supravodičov stúpa význam supermriežok v tom, že môžu slúžiť ako modelové štruktúry pre výskum nových supravodičov, známych taktiež vrstevnatou štruktúrou [42].

d) Mechanické vlastnosti kovových supermriežok

Mnohé anomálne vlastnosti supermriežok súvisia so zabudovanými napätiami v týchto štruktúrach. Existencia napätí je pochopiteľne východiskovým bodom pri vysvetľovaní mechanických vlastností supermriežok, spomedzi ktorých záujem vyvolala najmä superpružnosť v niektorých kombináciách materiálov (Cu/Ni, Ag/Pd, Cu/Pd, Au/Ni [43]). Nameralo sa až 2–4násobné zväčšenie modulu pružnosti. Podrobnejšie skúmanie však ukazuje, že interpretovať tento jav pomocou zabudovaných napätí nie je uspokojivé. Skutočnosť, že sa prejavuje pri malej perióde $\Lambda \leq 1,5 - 3$ nm) naznačuje, že treba uvážiť vplyvy na atómovej škále, resp. ovplyvnenie elektrónovej štruktúry materiálov [44, 45].



Obr. 13. Mikrotvrdosť podľa Vickersa TiN/VN supermriežky v závislosti na perióde Λ ; $d_{\text{TiN}} = d_{\text{VN}}$; celková hrúbka vrstvy je $2,5 \mu\text{m}$ [46].

Ešte obtiažnejšie je vysvetlenie anomálne vysokej mikrotvrdosti napätej supermriežky TiN/VN, ktorú objavili Helmersson et al. [46], pretože tu treba brať do úvahy elasticke i plastické vlastnosti materiálu. Zvýšenie tvrdosti, znázornené na obr. 13, je oproti TiN a VN až 2,5násobné a maximum $5,4 \cdot 10^4 \text{ Nmm}^{-2}$ sa dosahuje pri $\Lambda = 5,2$ nm. Autori veria, že tu ide o vplyv potlačenia pohyblivosti dislokácií v napätej supermriežke.

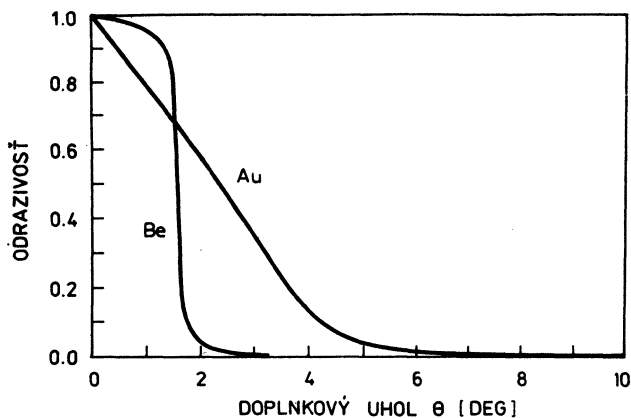
e) Optické vlastnosti kovových supermriežok

Vrstvová štruktúra, v ktorej sa periodicky mení index lomu s hĺbkou, selektívne odráža elektromagnetické vlnenie určitej vlnovej dĺžky. Na podobnom princípe je založená braggovská difrakcia na kryštáloch. Tieto dva rozličné a pritom komplementárne teoretické prístupy inšpirovali prípravu kovových supermriežok s periódou odpovedajúcou takej vzdialenosti rovín, ktorá sa nevyskytuje u bežných kryštálov. Pretože hrúbky vrstiev musia byť toho istého rádu ako vlnová dĺžka žiarenia, získali sa tým optické prvky — zrkadlá, monochromátory, interferenčné filtre, vhodné pre oblasť mäkkého röntgenového a ďalekého UV žiarenia. Vychádza sa tým zároveň v ústrety využitiu dnes populárneho žiarenia synchrotrónov, ktoré sú najintenzívnejším dostupným röntgenovým zdrojom.

Odraz rtg žiarenia na kovovej supermriežke je možné stanoviť na základe klasickej teórie difrakcie rtg žiarenia, kde odrazené žiarenie vzniká interferenciou sekundárneho vlnenia emitovaného atómami. Kinematický model je použiteľný, ak interakcia žiarenia s materiálom je zanedbateľná; v prípade silnej interakcie je potrebné použiť dynamický model Darwina a Prinsa (podľa [47]).

Druhý prístup predpokladá, že jednotlivé vrstvy kovovej supermriežky sú z hľadiska prechodu rtg žiarenia homogénnym prostredím charakterizované komplexným indeksom lomu $n = 1 - \delta + ik$ a pre výpočet odrazivosti využíva Fresnelove vzťahy.

Oba prístupy sú ekvivalentné. „Optický“ prístup je výhodný predovšetkým pre reálne supermriežky, kde absorpciu a defekty rozhrania nie je možné zanedbať. Základy tohoto modelu vychádzajú z prác Abelésa [48], ktorý spracoval šírenie sínusového elektromagnetického vlnenia vo vrstvovom prostredí. Zrkadlový odraz a prechod rtg žiarenia vrstvovou štruktúrou pre uhly dopadu $\alpha = \pi/2 - \Theta$ blízke $\pi/2$ (t.j. žiarenie dopadá na vrstvu takmer rovnobežne s povrchom) rozpracoval Parrat [49].



Obr. 14. Závislosť odrazivosti zlata a berýlia od uhlu dopadu pre žiarenie dopadajúce takmer rovnobežne s povrchom pri $\lambda = 1,24 \text{ nm}$ ($\delta_{\text{Au}} = 0,002$, $k_{\text{Au}} = 0,001$, $\delta_{\text{Be}} = 3,4 \cdot 10^{-4}$, $k_{\text{Be}} = 10^{-5}$) [50]

Na obr. 14 je krivka odrazivosti pre takúto oblasť uhlov dopadu pre jednoduchú vrstvu Au a Be pre mäkké rtg žiarenie [50]. Ako vidieť, hodnoty odrazivosti $R(\Theta) = I(\Theta)/I_0$ (I_0 je intenzita dopadajúceho žiarenia, $I(\Theta)$ je intenzita odrazeného žiarenia) sú v rozsahu $R \sim 10^{-4} - 10^{-6}$ pre uhly mimo oblasti totálnej reflexie, a preto jednoduché kovové vrstvy, resp. „sólo“ povrchy sa ako rtg zrkadlá nedajú použiť. Navyiac, odrazivosť klesá so štvrtou mocninou λ . Avšak pomer amplitúd dopadajúceho a odrazeného žiarenia je $\sim 10^{-2} - 10^{-3}$ a to naznačuje principiálnu možnosť dosiahnuť na kovovej supermriežke odrazivosť $R \sim 1$, ak sa na dostatočne veľkom počte rozhraní bude odrazené žiarenie skladať vo fáze.

Výpočet optických parametrov supermriežky pre rtg a UV oblasť je analogický postupu pre viditeľné spektrum. Tenká vrstva hrúbky d má výslednú odrazivosť.

$$R_f = \frac{R_t + R_b \exp\{2i\varphi\}}{1 + R_t R_b \exp\{2i\varphi\}}$$

kde R_t a R_b sú odrazivosti horného a spodného rozhrania a pre φ platí

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d (n^2 - n_0^2 \sin^2 \alpha_0)^{1/2},$$

α_0 je uhol, pod ktorým sa šíri žiarenie v prostredí nad vrstvou. Index lomu tohoto prostredia je n_0 .

Vzťah pre R_t umožňuje rekurentnou metódou vypočítať odrazivosti pre ľubovoľnú vrstvu supermriežky. Vysoká odrazivosť sa dosiahne, ak sa odrazené žiarenie zo všetkých rozhraní skladá vo fáze:

$$m\lambda = 2\Lambda \sin \Theta_0 \{1 - [2(\delta - ik)/\sin^2 \Theta_0]\}^{1/2}.$$

Tu $\Theta_0 = \pi/2 - \alpha_0$ je doplnkový uhol meraný od povrchu vrstvy a m je rád reflexie. Pre $\delta = k = 0$ je predošlý vzťah totožný s Braggovou rovnicou.

Väčšia odrazivosť pre rtg žiarenie sa zatiaľ dosiahla len v oblasti malých uhlov a väčšina optických prvkov pracuje v tomto režime.

Existujúce výpočty umožňujú určiť najvýhodnejšiu geometriu supermriežok pre konkrétne využitie v danej oblasti uhlov dopadu a vlnové dĺžky rtg žiarenia. V praxi sa bežne používajú zrkadlá pozostávajúce z dvoch materiálov — ťažkého reflektujúceho s vysokou odrazivosťou a čo najmenšou absorpciou žiarenia a ľahkého oddeľovacieho s malou absorpciou. Z mikroskopického hľadiska môžeme hovoriť o materiáloch s veľkou a malou elektrónovou hustotou. Ťažké reflektujúce vrstvy musia byť bez trhlín a oxidov, aby dosiahli maximálnu objemovú hustotu. Ľahké dištančné vrstvy nesmú obsahovať ťažké prímеси a cudzorodé inklúzie [51]. Výber materiálov je obmedzený možnosťami technológie pripraviť tenké vrstvy (niekoľko desiatín nm) s rozhraniami na úrovni 0,1 nm a s minimálnou interdifúziou. Osvedčujú sa kombinácie W/C, W/Si, Mo/Si, Rh/C, Ni/C a iné [52, 53, 54, 55]. Pri príprave je treba dať pozor na jav znázornený na obr. 5, súvisiaci s difúziou na rozhraní. Prejavuje sa napr. u štruktúry Rh/C [55]: rozhranie C/Rh (hore/dole) je ostrejšie ako rozhranie Rh/C.

Hodnoty odrazivosti takýchto supermriežok sú pre mäkké rtg žiarenie okolo 20 % [54]. Z dôvodov stability sa často žiaľ nedajú použiť páry kovov s väčšou teoretickou odrazivosťou vyše 40 % [56].

V súčasnosti sa používa najčastejšie periodické, ale aj kváziperiodické a aperiodické usporiadanie optickej multivrstvy. (Supermriežkou je iba periodické usporiadanie.)

Teoretické simulácie ukázali, že kváziperiodické usporiadanie multivrstvy umožňuje získať vyššie hodnoty odrazivosti pri menšom počte vrstiev než periodické usporiadanie. V kváziperiodickom usporiadaní sa pri zachovaní hodnoty Λ mení pomer hrúbok vrstiev. Pre zväčšenie šírky pásma filtra, resp. pre zväčšenie hodnoty integrálnej odrazivosti sa využíva aj aperiodické usporiadanie.

f) Amorfné reakcie v supermriežkach

Nie vždy je pre štúdium supermriežok potrebný veľký počet vrstiev. Mnohé fyzikálne procesy by sa principiálne dali skúmať aj na dvojvrstvách a v špeciálnych prípadoch

sa to aj robí. Často však sledovaný proces dáva malú zmenu meranej veličiny a jeho sledovanie umožní iba supermriežka s väčším počtom periód $N = 20 - 30$.

Ako príklad slúži amorfizačná reakcia v pevnej fáze, pozorovaná prvýkrát na supermriežke La/Au [12]. Je zrejmé, že reakcia prebieha aj v dvojvrstve, ak je zložená z vhodných prvkov. Skutočnosť, že bola pozorovaná na supermriežke, súvisí so spomínaným efektom „zosilnenia“.

Nový spôsob vzniku amorfnej zliatiny podnietil rozsiahly výskum na supermriežkach rozličného zloženia a počet systémov, v ktorých amorfizačná reakcia v tuhej fáze bola pozorovaná, stále rastie (Tab. I) [57].

Tab. I. Supermriežky, v ktorých sa pozorovala amorfizačná reakcia v pevnej fáze

Fe/Zr	Cu/Hf	Ni/Nb
Co/Zr	Fe/Ti	Au/La
Ni/Zr	Co/Ti	Au/Y
Co/Hf	Ni/Ti	Co/Sn
Ni/Hf	Co/Nb	Cu/Ho

Amorfizačná reakcia priamo súvisí s interdifúziou na rozhraniach supermriežky. Pri vhodnej kombinácii prvkov a vo vhodnom rozsahu teplôt vytvára sa na rozhraniach amorfna intermetalická zliatina. Rozsah teplôt, pri ktorých amorfizačná reakcia prebieha, je zhora ohraničený teplotou, pri ktorej dochádza k nukleácii príslušnej kryštalickej intermetallickej fázy (≥ 800 K).

Pre priebeh amorfizačnej reakcie sa predpokladajú tieto podmienky [58]:

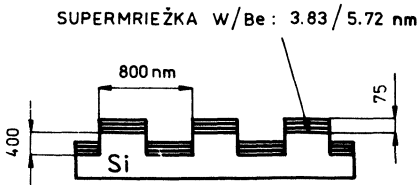
- oba kovy musia mať veľké záporné zmiešavacie teplo v amorfnej fáze;
- musí existovať veľký rozdiel v difúzných koeficientoch jedného materiálu v druhom a v príslušnej intermetallickej amorfnej zliatine (rozdiel v difúzných koeficientoch môže byť tak veľký, že dochádza prakticky k difúzii len jedného prvku);
- prvky supermriežky netvoria kryštalickú fázu, ktorá by vznikla difúziou jedného prvku do mriežky druhého prvku.

Amorfizačné reakcie podnietili fyzikálny výskum vo viacerých oblastiach. Poskytujú novú možnosť prípravy amorfnej kovovej zliatiny žíhaním pri teplotách < 800 K bez potreby prudkého ochladenia taveniny. Dávajú navyš možnosť pripraviť amorfne zliatiny aj v takých systémoch, kde zatiaľ technológia rýchleho ochladenia nevedla k úspechu [58]. Umožňujú podrobné štúdium prechodu do amorfneho stavu, pretože na rozdiel od rýchleho ochladenia 10^{-2} s – 10^{-7} s amorfizačná reakcia je relatívne pomalý proces (10^2 s – 10^5 s). Prinášajú nový pohľad na amorfnú zliatinu, ktorá vzhľadom na spôsob prípravy prudkým ochladením taveniny sa chápala ako „zamrznutá“ kvapalina. S tým súvisia aj nové možnosti štúdia stability metastabilných amorfnych systémov. Pretože veľkosť difúzneho koeficientu rýchlo difundujúceho prvku v príslušnej amorfnej zliatine určuje rast amorfnej fázy, dali amorfizačné reakcie aj nový impulz pre štúdium atómového transportu v amorfnej štruktúre.

5. Praktické využitie kovových supermriežok

V predošlých kapitolách sme poukázali na historický význam štúdia supermriežok, ktorý otvára cesty k novým poznatkom v oblasti magnetizmu, supravodivosti, mechanických vlastností a elektrónového aj atomárneho transportu v pevných látkach. Tento výskum postupne vyúsťuje alebo môže vyústiť do praktických aplikácií pri zhotovení pamätí, nových supravodičov, ultratvrdých povrchových pokrytí, senzorov a p.

Oblasťou, kde supermriežky širšie využitie už nachádzajú je UV a rtg optika. V kap. 4e opísané optické prvky sú nepostrádateľné pri využití synchrotrónového žiarenia, vákuová UV optika sa uplatňuje v solárnej aj galaktickej astronómii na palubách kozmických lodí a sond [59]. Hoci prvé multivrstvové zrkadlo pre rtg lúče bolo zhotovené r. 1954, širšie využitie sa datuje od začiatku 80. rokov. Z aplikačného hľadiska sa pozornosť venuje zvýšeniu stability supermriežok pre tieto účely, tj. problému, na ktorý upozornila už pionierska práca [5]. Napr. Stearns et al. [60] ukázali, že rtg zrkadlo Mo/Si je krátkodobe zaťažiteľné pri 400°C (rtg lasery). Vysokú stabilitu musia mať i prvky na spracovanie intenzívneho synchrotrónového žiarenia z wigglerov a undulátorov. Zrkadlo W/Be zasa zvýšilo šesťnásobne difrakčnú účinnosť optickej mriežky zhotovenej leptaním kremíka (obr. 15) [61]. Táto štruktúra má v sebe prvky supermriežky s dvojrozmernou periodicitou (obr. 4).



Obr. 15. Difrakčná mriežka z kremíku s povrchovým zrkadlom W/Br [61].

Optické supermriežky sú predurčené aj pre modernú biológiu a v technológii mikroelektroniky pre rtg litografiu.

V mikroelektronických štruktúrach nájdu kovové supermriežky uplatnenia zasa v metalizácii súčiastok a obvodov. Vytvorenie vrstvy silicidu ťažkotaviteľného kovu rozdifundovaním supermriežky (difúzne zlievanie) je výhodné z hľadiska potreby minimalizácie tepelného zaťaženia vytváratej súčiastky. Kovové supermriežky sú tiež „východiskovým materiálom“ pri získaní amorfných tenkých vrstiev, vrstiev, ktoré slúžia ako difúzne bariéry medzi polovodičovým substrátom a vrchnými vrstvami metalizácie. Využíva sa pritom fakt, že eliminovaním difúzie po hraniciach zrn sa nepriestupnosť bariéry niekoľkonásobne zvýši. (napr. W/Si, TiW/Si, W/Zr, Cu/Ta [62, 63]).

6. Záver

Výskum kovových supermriežok otvára možnosti pre rozvoj fyziky pevných látok a korešpondujúcich špičkových technológií v mikroelektronike, mikromechanike, rtg

a UV optike a v ďalších oblastiach. Stimuluje výskum interakcií na atomárnej úrovni a tým zároveň nielen tvorbu nových materiálov s doteraz nepoznanými vlastnosťami, ale aj poznanie stability a spoľahlivosti známych štruktúr a súčastok, ich povrchov a rozhraní. Podnecuje rozvoj fyzikálnych teórií, experimentálnych aktivít i laboratórnych a neskôr azda priemyselných techník a technológií.

Vzhľadom na svoj prierezový charakter a širokospektrálny dopad predstavuje problematika kovových supermriežok (resp. obecné supermriežok) nový, svojský pohľad a prístup k poznávaniu vo fyzikálnom aj materiálovom výskume, pri ktorom sa využívajú rozhrania a interakcie neexistujúce v prírode.

Anglický fyzik R. V. Hesketh hovorí: Boh stvoril objem, diabol stvoril povrch. Podľa toho supermriežky patria skôr k dielam diabolským ako božským. Napriek tomu veríme, že táto skutočnosť neodvedie vedecký svet od ich ďalšieho skúmania.

L i t e r a t ú r a

- [1] ESAKI, L., TSU, R.: IBM Res. Note, (1969), RC-2418.
- [2] ESAKI, L., TSU, R.: IBM J. Res. Develop. 14 (1970), 61.
- [3] JOHANSSON, C. H., LINDE, J. O.: Annalen der Physik 5 (1936), 1.
- [4] TAMMANN, G.: Z. für anorg. und allgem. Chem. 107 (1919), 1.
- [5] DU MOND, J., YOUTZ, J. P.: Appl. Phys. 11 (1940), 357.
- [6] ESAKI, L. et al.: Proc. 11th Int. Conf. Phys. Semicond., Warsaw, 431.
- [7] WASYLUK, R.: Slaboproudý obzor 36 (1975), 73.
- [8] JOYCE, B. A.: Surf. Sci. 86 (1979), 92.
- [9] SHINJO, T.: *Metallic Superlattices*, (vyd. SHINJO, T., TAKADA, T.). Amsterdam, Elsevier 1987, 1.
- [10] DRESSSELHAUSOVÁ, M. S.: Čs. čas. fyz. A 36 (1986), 126.
- [11] GREER, A. L.: In: *Diffusion phenomena in thin films and microelectronic materials*. (Vyd. GUPTA, D., HO, P. S.). Noyes Publ. N. J. 1988, 146.
- [12] SCHWARZ, R. B., JOHNSON, W. L.: Phys. Rev. Lett. 51 (1983), 415
- [13] CAPASSO, F.: *Physics of Quantum Electron Devices*. Springer Verlag, Berlin 1990.
- [14] FALCO, C. M.: J. de Phys. 48 (1987), Suppl. No 11, C5.
- [15] KARKUT, M. G., TRISCONI, J. M., ARIOSA, D., FISCHER, O.: Phys. Rev. B34 (1986), 4390.
- [16] BEASLEY, M. R., MATIJEVIC, V.: In: *Metallic Superlattices* (vyd. SHINJO, T., TAKADA, T.) Amsterdam, Elsevier 1987, 187.
- [17] BOUFELFEL, A. et al.: Solid State Commun. 68 (1988), 201.
- [18] VOOK, F. L.: Phys. Bull. 35 (1984), 475.
- [19] KAZAMA, N. S. et al.: J. Magn. Magn. Mater. 35 (1983), 214.
- [20] FLYNN, C. P.: J. Phys. F: Met. Phys. 18 (1988), L 195.
- [21] SEAH, M. P., BRIGG, D.: In: *Practical Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy* (vyd. BRIGG, D., SEAH, M. P.) Chichester, John Wiley and Sons, 1983, 1.
- [22] HALL, P. M., MORABITO, J. M., PANOUSIS, N. T.: Thin Solid Films 41 (1977), 341.
- [23] TAKAHANA, T., ARAKI, S., SHINO, T.: J. Magn. Magn. Mater. 82 (1989), 287.
- [24] LEPETRE, Y., RASIGNI, G.: Opt. Lett. 9 (1984), 433.
- [25] SHENG, T. T., CHANG, C. C.: IEEE Trans. Electron Devices ED-23 (1976), 531.
- [26] FUJII, Y.: In *Metallic Superlattices* (vyd. SHINJO, T., TAKADA, T.) Amsterdam, Elsevier 1987, 33.
- [27] DANIEL, V., LIPSON, H.: Proc. Roy. Soc. A 18 (1943), 368, A 182 (1944), 378.

- [28] HANG, W. Y., AN, H., ZHENG, Y., XIANG-JIN, LI., DUAN, F.: *Phys. Stat. Sol. (a)* **96** (1986), 337.
- [29] DIMMICH, R.: *J. Phys. F: Met. Phys.* **15** (1985), 2477.
- [30] CARCIA, P. F., SUNA, A.: *J. Appl. Phys.* **54** (1983), 2000.
- [31] KANEKO, T. et al.: *J. Phys. F: Met. Phys.* **18** (1988), 2053.
- [32] KHAH, M. R. et al.: *Phys. Rev. B* **32** (1983), 7/86.
- [33] BAIBICH, M. N.: *Phys. Rev. Lett.* **61** (1988), 2472.
- [34] KAWAGUCHI, K., YAMAMOTO, R., HOSOITO, N., SHINJO, T., TAKADA, T.: *J. Phys. soc. Japan* **55** (1986), 2375.
- [35] LEVY, P. M., OUNADJELA, K., ZHANG, S., WANG, Y., SOMMERS, C. B., FERT, A.: *J. Appl. Phys.* **67** (1940), 5914.
- [36] PIERRE, S.: In: *Magnetism of metals and alloys* (vyd. M. CYROT), North Holland Amsterdam, 1982, 266.
- [37] SHINJO, T. et al.: *Solid State Commun.* **52** (1984), 257.
- [38] FLEVARIS, N. K., KELLERSON, J. B., HILLIARD, J. E.: *J. Appl. Phys.* **53** (1982), 8046.
- [39] SATO, N.: *J. Appl. Phys.* **61** (1987), 1979.
- [40] SATO, N.: *J. Appl. Phys.* **59** (1986), 2514.
- [41] AKIHAMA, R., OKAMOTO, Y.: *Solid State Commun.* **53** (1983), 655.
- [42] GRIFFIN, A.: *Phys. Rev. B* **38** (1988), 8900.
- [43] TSAKALAKOS, T.: *J. Vac. Sci. Technol. B* **4** (1986), 1447.
- [44] BANERJEA, A., SMITH, J. R.: *Phys. Rev. B* **35** (1987), 5413.
- [45] DODSON, B. W.: *Phys. Rev. B* **37** (1988), 727.
- [46] HELMERSSON, I., V. et al.: *J. Appl. Phys.* **62** (1987), 481.
- [47] BATTERMAN, B. W., COLE, H.: *Rev. Mod. Phys.* **36** (1964), 681.
- [48] ABELÉS, F.: *Ann Phys.*, 12th Series, **5** (1950), 596.
- [49] PARRAT, L. G.: *Phys. Rev.* **95** (1954), 359.
- [50] SPILLER, E.: In: *Physics, Fabrication and Applications of Multilayered structures* (Vyd. DHEZ, P., WEISBUCH, C.). Plenum Press, New York and London 1988, 271.
- [51] HOUDY, P., ZIEGLER, E., NÉVOT, L.: *Thin Solid Films* **141** (1986), 99.
- [52] BARBEE, T. W. et al.: *Appl. Phys. Lett.* **50** (1987), 1841.
- [53] ARBAONI, M. et al.: *Appl. Optics* **29** (1990), 477.
- [54] VIDAL, B. A., MARFAING, Y. C.: *J. Appl. Phys.* **65** (1989), 3453.
- [55] BOHER, P., HOUDY, P., KALKATI, P., DUAHABI, M., BARCHEWITZ, R.: *Appl. Phys. Lett.* **57** (1990), 834.
- [56] NAMIOKA, T.: *Revue Phys. Appl.* **23** (1988), 1711.
- [57] GUYOT, P.: *These Univ. Nancy*, 1988.
- [58] SAMWER, A.: *Phys. Rep.* **161** (1988), 1.
- [59] CATURA, R. C.: *Phys. Scripta T* **31** (1990), 208.
- [60] STEARNS, D. G. et al.: *J. Appl. Phys.* **67** (1990), 2415.
- [61] UTSUMI, Y., KYURAGI, H., URISU, T.: *J. Vac. Sci. Technol. B* **8** (1990), 436.
- [62] ANDERSON, W. T. J., CHRISTOU, A., DAVEY, J. E.: *Thin Solid Films* **104** (1983), 57.
- [63] OH, J. E. et al.: *J. Vac. Sci. Technol. B* **6** (1988), B25.