

MĚŘÍCÍ PLATFORMA PRO RENTGENOVOU REFLEKTOMETRII XRR

Measurement Platform for XRR

Jiří Maršík

Abstrakt: Řada moderních technických odvětví stále intenzivněji využívá struktury tvořené velice tenkými vrstvami nanesenými na podložku. Ty nachází uplatnění především při výrobě mikroprocesorů, fotovoltaických článků novější generace nebo speciální rentgenové optiky. Metoda rentgenové reflektometrie (XRR) je nesmírně důležitým diagnostickým nástrojem, který umožňuje měřit celou řadu vlastností těchto struktur. Proto neustále roste zájem o velice rychlá měřicí zařízení využívající metodu XRR. Tento článek popisuje konstrukční řešení takové měřicí platformy, která byla navržena ve spolupráci s Fakultou strojní ČVUT v Praze.

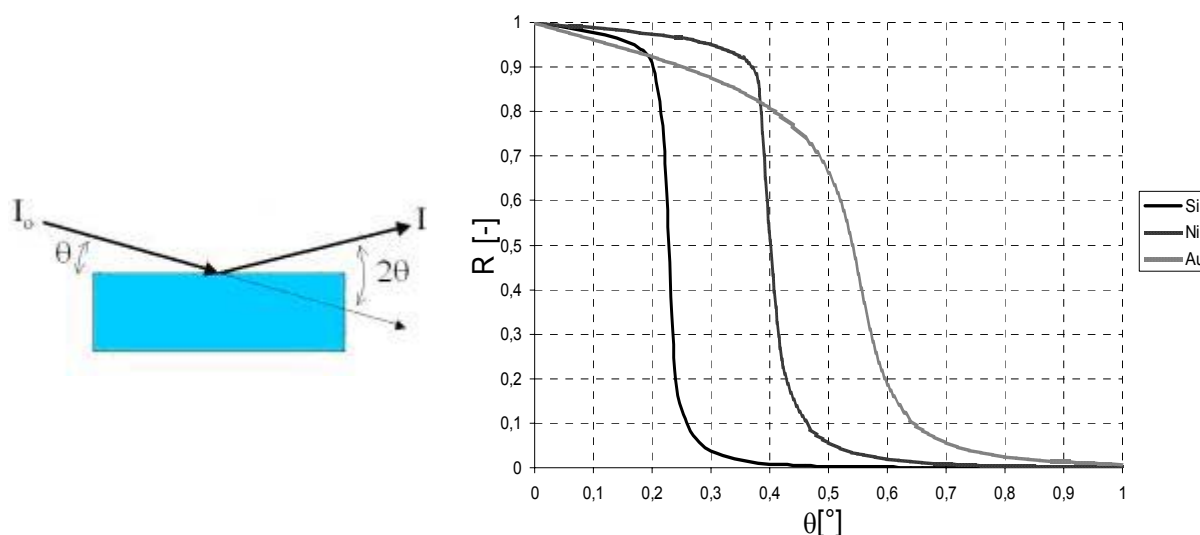
Klíčová slova: XRR, paralelní kinematika

1. Úvod

Rentgenová reflektometrie XRR (X-Ray Reflectivity) je moderní měřicí metoda určená především k zjišťování vlastností tenkých vrstev a multivrstev nanesených na podložce. Slovo “tenká“ v tomto případě znamená tloušťku v řádu nanometrů až stovek nanometrů. Takovéto struktury se dnes používají například v polovodičovém průmyslu při výrobě mikroprocesorů nebo jako základ moderních fotovoltaických panelů. Tenké vrstvy jsou většinou připravovány naprašováním nebo napařováním ve vakuu. Jedná se o velice náročné technologie, neboť funkčnost výsledného zařízení závisí nejen na přesném dodržení tloušťky vrstev, ale také na kvalitě rozhraní, které musí být co nejostřejší, bez pronikání jednoho materiálu do druhého, a na co nejmenší poréznosti materiálu. Metoda XRR v podstatě jako jediná dokáže měřit nejen tloušťku vrstev, ale i jejich hustotu a mikrodrsnost povrchu. Obrovskou výhodou XRR je navíc její naprostá bezkontaktnost a nedestruktivnost. Měření je přitom relativně časově nenáročné, nevyžaduje žádnou přípravu vzorku a probíhá v běžných laboratorních podmínkách. Jedinou nevýhodou je nutnost znát alespoň přibližnou skladbu měřeného vzorku, tj. složení a pořadí jednotlivých materiálů. Protože však XRR slouží hlavně během vývoje a výroby jako kontrolní mechanismus a nikoliv k identifikaci zcela neznámých vzorků, jsou tyto informace k dispozici.

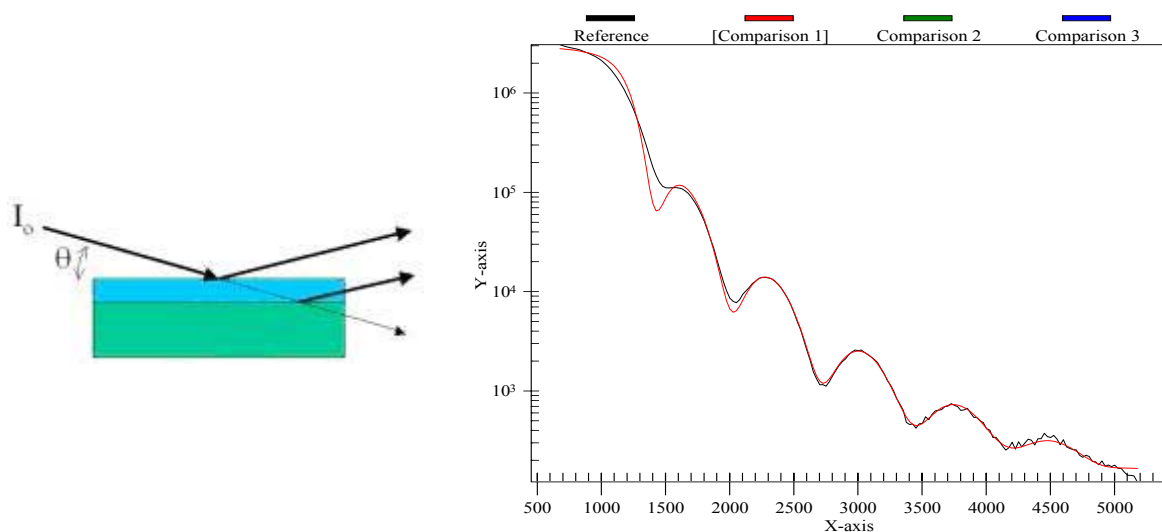
2. Princip metody XRR

Metoda XRR je založena na zkoumání odrazu rovnoběžného svazku rentgenového záření od povrchu vzorku při velmi malých, téměř tečných, úhlech dopadu. Pro úplnost připomínám, že v oboru rentgenového záření se na rozdíl od běžné optiky měří úhel dopadu k povrchu vzorku, nikoliv k jeho normále. Pokud je úhel dopadu menší než tzv. kritický úhel, dochází k totálnímu odrazu dopadajícího záření. Tento kritický úhel je například při dopadu rentgenového záření spektrální čáry $\text{CuK}_{\alpha 1}$ ($\lambda = 0,154 \text{ nm}$) na ideální povrch křemíku $0,22^\circ$, na nikl $0,42^\circ$ nebo na zlato $0,57^\circ$. Při dopadu pod větším úhlem dochází k velmi rychlému poklesu intenzity odraženého záření (Obr.1). Velikost kritického úhlu souvisí s hustotou odrážejícího materiálu, a proto lze hustotu materiálu zjistit právě na základě měření kritického úhlu. Množství odraženého záření navíc silně závisí na kvalitě povrchu. Zjednodušeně řečeno, čím je povrch drsnější, tím méně záření se odrazí. Odtud pramení schopnost XRR měřit mikrodrsnost vysoce kvalitních povrchů.



Obr. 1 – Odrazivost dokonalého povrchu plného materiálu pro vlnovou délku $0,154 \text{ nm}$ (zdroj: Center for X-Ray Optics)

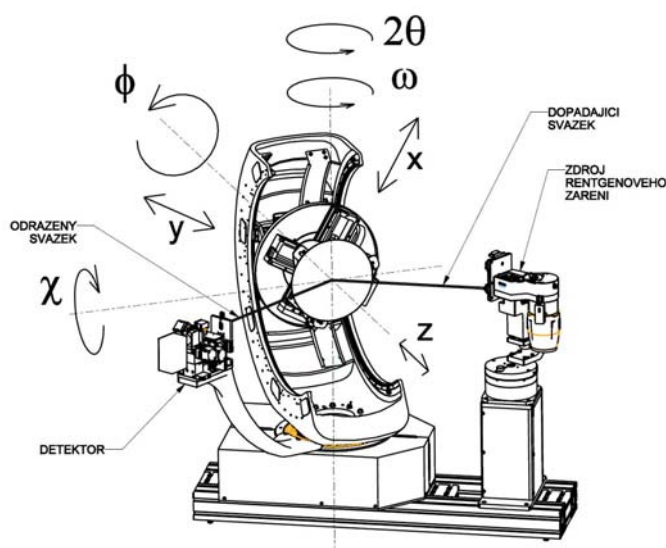
Tím však možnosti metody XRR zdaleka nekončí. Další ohromné využití nachází XRR právě v oboru tenkých vrstev. Nejjednodušším příkladem tenkovrstvé struktury je jednoduchá vrstva nanosená na podložce (Obr.2). Pokud totiž rentgenové záření dopadá pod větším než kritickým úhlem, dochází na povrchu jak k odrazu tak k průniku záření dovnitř vrstvy. Na rozhraní mezi vrstvou a podložkou dojde opět k částečnému odrazu a vlny odražené od vnějšího povrchu a od rozhraní vrstvy s podložkou spolu interferují, což vede v závislosti na úhlu dopadu k zesílení nebo k zeslabení výsledného záření. Pokud vykreslíme závislost intenzity odraženého záření na úhlu dopadu, objeví se v grafu periodická křivka. Rozteč jednotlivých period přímo souvisí s tloušťkou vrstvy, zatímco rozdíl mezi sousedními lokálními maximy a minimy je dán kvalitou vnějšího povrchu a jednotlivých rozhraní. Skutečnost, že přesnost měření tloušťky vrstvy je lepší než 1%, jasně ukazuje, jak nesmírně mocný nástroj při vývoji struktur s tenkými vrstvami metoda XRR představuje.



Obr. 2 – Odraz na tenké vrstvě Ti nanesené na Si podložce. Tloušťka vrstvy 197Å, vlnová délka použitého rentgenového záření 0,154 nm. Měření provedeno na realizovaném prototypu měřící platformy.

3. Požadavky na novou měřící platformu

Z principu metody XRR vyplývá, že úkolem měřícího přístroje je změřit odrazivost vzorku v závislosti na úhlu dopadu záření. Takové měření lze provádět na konvenčním goniometru, který se skládá z nepohyblivého zdroje úzkého rovnoběžného svazku rentgenového záření, vlastního goniometru a pohyblivého detektoru. Při vlastním měření se goniometr se vzorkem otáčí okolo osy ω a detektor se otáčí dvojnásobnou rychlostí okolo osy 2θ , která je s osou ω totožná (Obr.3). Goniometr umožňuje pohybovat se vzorkem nejen kolem osy ω , ale i v dalších pěti stupních volnosti, takže je možné proměřit libovolný bod vzorku.



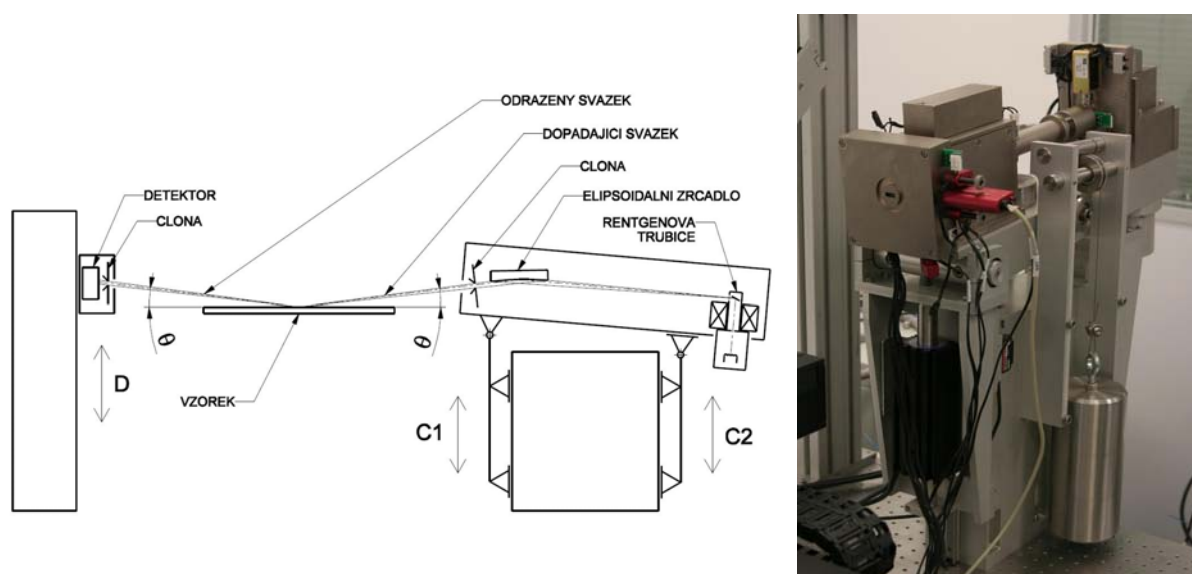
Obr. 3 – Konvenční goniometr

Konvenční goniometr využívá klasické sériové kinematiky, přičemž každá osa má přímou vazbu na geometrii měření. Pokud se všechny tři rotační osy protínají v jednom bodě, který zároveň leží na povrchu vzorku, a posuvné osy jsou vzájemně kolmé, pak můžeme těžit z hlavní výhody – řízení a odměřování polohy je nejjednodušší možné, neboť v případě XRR stačí používat pouze aktuátor a odměřování osy ω , která má přímou vazbu na úhel dopadu θ . Skutečnost je však jiná. Musíme si uvědomit, že starší goniometr na Obr.3 má na výšku téměř 1,5m. Jedná se o výrobně i montážně složité zařízení a rotační osy jsou ve skutečnosti mimoběžné až o milimetry. Goniometr proto nemá žádný skutečný mechanický střed, se kterým by bylo možné ztotožnit jak povrch vzorku, tak dopadající měřící svazek. Střed goniometru je proto pouze virtuální a při měření jsou ve skutečnosti aktivní téměř všechny osy, které pouze díky složitému řízení zajistí správnou kinematiku měření. Další nevýhodou je poměrně špatná tuhost celého systému, složitá výroba i montáž a časová náročnost zakládání vzorku, neboť to je nutné provádět ve vodorovné poloze a teprve pak dopravit vzorek do měřící polohy pohybem osy χ . Všechny tyto nevýhody se staly impulsem ke konstrukci měřící platformy nové generace.

Hlavní požadavek na nové zařízení přesně odpovídá duchu dnešní doby: rychlost měření, rychlost měření a zase rychlost měření. Konečným cílem je totiž nahradit současnou namátkovou kontrolu ve výrobě kontrolou všech dílů. Přitom platí, že nahradit dva současné stroje jedním dvakrát rychlejším se rozhodně vyplatí, i kdyby byl dvakrát dražší. Vedlejší prioritou je zvýšení přesnosti měření s ohledem na cenu a rozměry zařízení.

4. Navržené řešení

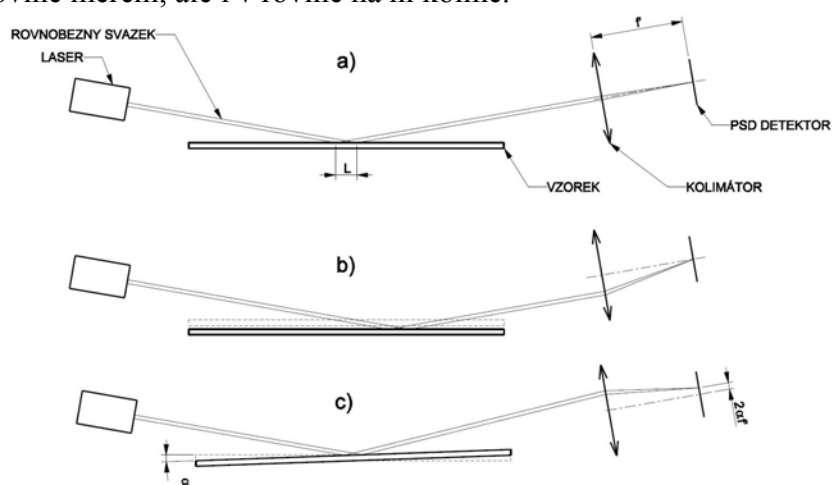
Cesta ke splnění požadavků vedla přes dvě základní inovace. Za prvé byla kompletně změněna kinematická koncepce stroje. Za druhé byl vyvinut nový systém zaměření natočení vzorku pomocí světla místo dosud používaného hlavního rentgenového svazku. Podívejme se postupně na řešení v obou oblastech.



Obr. 4 – Optické schéma měření XRR použité v navržené platformě (vlevo) a realizovaný zdroj rentgenového svazku (vpravo)

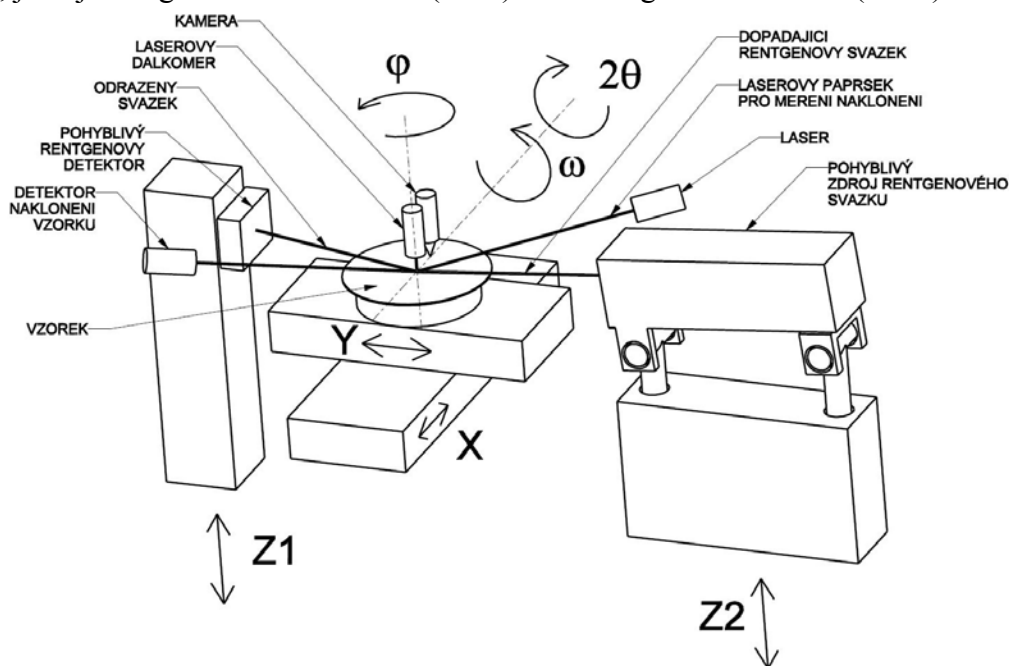
Uspořádání měření je znázorněno na Obr. 4. Vzorek zůstává vodorovný a během měření je nepohyblivý, zatímco zdroj i detektor se „otáčí“ okolo virtuálního středu goniometru, který leží na povrchu vzorku. Většina měření se odehrává v rozsahu úhlu dopadu 0° - 2° , nikdy nepřesahuje 5° , a proto je možné přesný kruhový pohyb zdroje a detektoru nahradit pohybem přibližným. Důležité jsou totiž pouze úhly, zatímco drobná změna dráhy paprsku je přípustná. V případě pohyblivého zdroje měřícího svazku se tak přímo nabízí řešení s využitím paralelní kinematiky. Mechanismus je tvořen dvěma lineárními aktuátory, které jsou připojeny přímo k tuhé základně a jejich osy jsou svislé a rovnoběžné. Pomocí přesných ložisek a lineárního vedení se pohyb lineárních aktuátorů přenáší na tuhý pohyblivý rám, ke kterému je připevněna rentgenová trubice a další optické prvky. Díky poměrně velké vzdálenosti mezi oběma aktuátory má toto uspořádání velmi dobré úhlové rozlišení ($1''$) a zároveň dovoluje měnit výšku virtuálního středu goniometru v závislosti na tloušťce vzorku. U detektoru je situace ještě jednodušší, neboť jsou jeho vlastnosti v uvedeném rozsahu úhlů prakticky neměnné a není s ním tedy třeba natáčet kolmo na odražený svazek. Takže jako náhrada kruhového pohybu stačí realizovat pohyb posuvný.

Metoda XRR ze své podstaty závisí na přesném odměřování úhlu dopadu. Jak ale nalézt počátek pro měření, kterým je povrch vzorku? Vzorky jsou totiž často klínovité nebo prohnuté a nelze spoléhat na upínací systém. Jednou možností je využít přímo měřící rentgenový svazek. Tento postup je však zdlouhavý, protože je nejprve třeba vzorek zaměřit a pak teprve je možné zahájit vlastní měření. Proto je žádoucí změřit skutečné natočení jiným nezávislým systémem a hodnotu vložit jako korekci při zpracování výsledků. Místo složitěho rentgenového záření navíc k zaměření stačí světlo. K tomuto úkolu by standardně postačil autokolimátor, který využívá svazek světla dopadající kolmo na povrch. Oblast nad vzorkem však není přístupná kvůli dalším měřicím modulům. Proto byl vyvinut nový systém založený na použití laserového svazku, jehož funkce je patrná z Obr.5. Úzký rovnoběžný svazek dopadá na vzorek pod téměř tečným úhlem. Do značné míry tak stopa svazku na vzorku kopíruje stopu vlastního rentgenového svazku, takže měříme tam, kde nás to skutečně zajímá. Svazek po odrazu prochází kolimátorem, v jehož ohniskové rovině leží PSD detektor. Toto uspořádání není citlivé na svislý pohyb vzorku (Obr.5b), ale měří pouze naklopení (Obr.5c). Další výhodou tohoto systému je, že dokáže měřit v omezené míře naklopení v obou směrech, tedy nejen v rovině měření, ale i v rovině na ní kolmé.



Obr. 5 – Navržený systém měření naklopení vzorku

Kromě měření úhlu naklonění nás samozřejmě zajímá poloha vzorku ve svislém směru, aby bylo možné ztotožnit virtuální střed goniometru s povrchem vzorku. Pro tento účel byl použit standardně dodávaný laserový dálkoměr. Posledním zaměřovacím prvkem je kamera umožňující nalézt na povrchu vzorku žádanou oblast, která má být měřena. Celkové uspořádání celé platformy je znázorněno na Obr.6. Tento obrázek navíc napovídá, proč zde hovoříme o metrologické platformě. Záměrem do budoucna totiž není sestavit jednorúčelový stroj pouze pro XRR, ale univerzální platformu skládající se ze společných částí, jako je manipulační systému vzorku nebo základna stroje, a z částí volitelných dle přání zákazníka, což jsou měřicí moduly nejen pro uvedenou metodu XRR ale i pro jiné rentgenové měřicí metody, jako je rentgenová fluorescence (XRF) nebo rentgenová difrakce (XRD).



Obr. 6 – Celkové uspořádání navržené měřicí platformy

5. Závěr

V prostoru tohoto příspěvku samozřejmě nelze postihnout všechny další důležité prvky, které byly nezbytné k úspěšné realizaci celého stroje, jako je izolace stroje od vibrací z okolí, stabilizace teploty nebo čistota vnitřního prostředí, které jsou jistě nezbytné pro úspěch celého projektu. Tím podstatným však zůstávají dva body: využití paralelní kinematiky, která nabízí především vynikající tuhost a přesnost, a použití paralelní metrologie pro zaměření vzorku, která pro změnu značně šetří čas potřebný k měření. Výhody obou principů jasně prokázal i realizovaný prototyp.