

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Josef Kuběna

Poruchy krystalové mřížky křemíku a rentgenová topografie

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 28 (1983), No. 5, 267--275

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139422>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1983

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>

# Poruchy krystalové mřížky křemíku a rentgenová topografie\*)

Josef Kuběna, Brno

## 1. Úvod

Základní surovinou pro polovodičový průmysl je monokrystalický křemík. Přesto, že kvalita průmyslově vyráběných monokrystalů křemíku mnohonásobně převyšuje kvalitu jakýchkoliv přírodních monokrystalů (včetně diamantů), zdaleka ještě nevyhovuje všem požadavkům plynoucím z technologie výroby integrovaných obvodů velmi vysokého stupně integrace – více než  $10^3$  tranzistorů v jedné součástce. Mezi ně patří např. čipy mikroprocesorů, paměti o kapacitě větší než 1 kb apod. Tyto nároky na dokonalost krystalové mřížky plynou zejména z těchto dvou faktů:

1. Plošné rozměry jednotlivých funkčních elementů jsou mikrometrových rozměrů. Např. jeden tranzistor řízený elektrickým polem ze čtveřice, která tvoří jednu paměťovou buňku, má lineární rozměry asi  $3 \mu\text{m}$  (tj. asi 5 vlnových délek světla).

2. Základní funkční prvek polovodičových součástek p – n přechod, je taková oblast krystalu, kde se mění typ vodivosti z p na n, jako důsledek nepatrné změny v chemickém složení. Stačí k tomu např. v každém miliónu atomů nahradit několik desítek atomů Si za atomy fosforu (provádí se difúzí nebo implantací).

Každá porucha krystalové mřížky (např. dislokace – porucha její periodicity nebo precipitát – mikroskopická částice jiného chemického složení atd.) i když její lineární rozměr je pouze zlomek mikrometru, nepříznivě ovlivňuje elektrické parametry p – n přechodu (klesá závěrné napětí, roste závěrný proud a elektrický šum). Jestliže se poruchy vyskytují už v základním materiálu, v monokrystalu křemíku, pak vysokoteplotní procesy (oxidace i difúze dopantů probíhají při teplotách větších než  $1000^\circ\text{C}$ ) během technologie výroby integrovaných obvodů jejich negativní vliv ještě znásobí.

Trendy dalšího vývoje integrovaných obvodů směřují k vytváření funkčních struktur submikrometrových rozměrů (místo světelné litografie se použije elektronové litografie) a dále k jejich uspořádání do několika nad sebou uložených vrstev vzájemně funkčně propojených (trojrozměrná integrace) [1]. Ekonomika výroby si přitom vyžaduje krystaly velkých rozměrů. Ve světě se už dnes užívají bezdislokační monokrystaly křemíku o průměru až 150 mm, délky větší než 1,5 m a hmotnosti téměř 60 kg.

Z uvedeného je zřejmé, jaký význam mají pro polovodičový průmysl experimentální metody, kterými lze zviditelnit poruchy krystalové mřížky. Mezi tři nejčastěji užívané patří transmisní elektronová mikroskopie (pro zviditelnění jemné struktury mřížkových poruch), leptací techniky spojené s optickým nebo elektronovým rastrovacím mikroskopem a rentgenová topografie, o níž podrobněji pojednáme v tomto

\*) Věnováno k šedesátinám doc. RNDr. MARTINA ČERNOHORSKÉHO, CSc.

článku a která nám v jeho druhé části umožní podrobněji nahlédnout do specifiky „světa poruch“ krystalové mřížky křemíku, s nimiž se naše polovodičová výroba denně setkává.

Motivaci k intenzivnímu studiu vlastností křemíku nediktuje jen jeho prioritní postavení v oblasti elektroniky, ale i nové a i překvapivé fyzikální efekty, jako je např. přesycení bezdislokačních monokrystalů Si vlastními intersticiálními atomy (jejich koncentrace je až o několik řádů větší, než jak plyne z termodynamických úvah [8]), nebo getrační schopnost mřížkových poruch uměle zavedených na opačnou stranu křemíkové destičky, než kde je vytvářena funkční struktura [10], kterou sice světoví výrobci elektroniky úspěšně využívají, ale která není dosud teoreticky objasněna.

## 2. Princip rentgenové topografie

Interakce rentgenového záření s monokrystalem je popsána v rámci elektromagnetické teorie Laueovou dynamickou teorií difrakce [2], kterou pro deformované krystaly modifikoval Takagi [3] a s přihlédnutím ke koherenčním vlastnostem rtg záření zformuloval Holý [4].

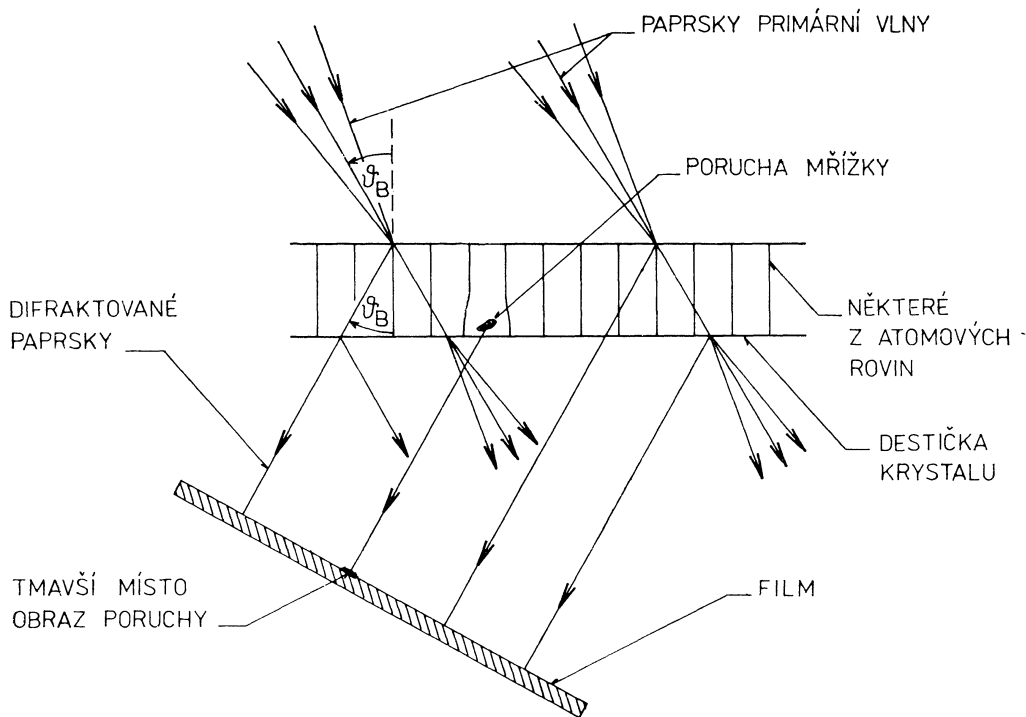
Rentgenové záření difraktované na dokonalém monokrystalu má dvě udivující vlastnosti, které jsou důsledkem jeho geometricky přesné stavby krystalové mřížky:

1. Je-li krystal nastaven do difrakční polohy, tzn., že je splněna Braggova rovnice  $2d \sin \vartheta_B = \lambda$ , (kde  $\vartheta_B$  je úhel mezi dopadajícím paprskem a příslušnou atomovou rovinou,  $d$  mezivířinná vzdálenost,  $\lambda$  vlnová délka rtg záření), je difraktovaný i přímý svazek mnohonásobně méně absorbován, než jak to odpovídá absorpčnímu koeficientu (efekt anomální absorpce). Primární a difraktovaná vlna vytváří totiž v krystalu stojaté vlnění, přičemž maxima amplitud tohoto vlnění leží při splnění Braggovy podmínky přesně uprostřed atomových rovin. Výrazný pokles absorpce nastává proto, že se zmenšila interakce vlnění s elektrony, neboť uprostřed atomových rovin je elektronová hustota minimální.

2. Difraktovaný svazek má v rovině difrakčních úhlů vysokou rovnoběžnost. Této vlastnosti si všimněme podrobněji, neboť nám umožní alespoň kvalitativně objasnit vznik kontrastu na rentgenovém topogramu.

Ze všech paprsků, které dopadají na monokrystal, difraktuji na atomových rovinách jen ty, které se od směru určeného difrakčním úhlem  $\vartheta_B$  (viz obr. 1), neodchylují o úhel větší, než je šířka reflexní křivky  $\Delta w$  (reflexní křivkou se nazývá závislost relativní intenzity difrakce na difrakčním úhlu  $\vartheta$  při difrakci rovinné vlny). Její šířka závisí na vlastnostech rtg záření (vlnové délce) i na vlastnostech monokrystalu, konkrétně na prostorovém rozložení elektronové hustoty, a nabývá řádově hodnot  $10^{-5}$  rad.

V okolí poruchy krystalové mřížky, jako např. v okolí dislokace, precipitátu apod., je krystalová mřížka deformována a tím je tedy narušena její přísná periodicitá. V důsledku toho vzroste v tomto místě krystalu šířka reflexní křivky, a tím se do difrakčního směru „přenes“ více energie z dopadajících paprsků, než je tomu v okolí. Zachytíme-li všechny difraktované paprsky na film, pak místa odpovídající stínové projekci poruch



Obr. 1: Schéma chodu paprsků při difrakci rtg záření a vytváření obrazu poruchy.

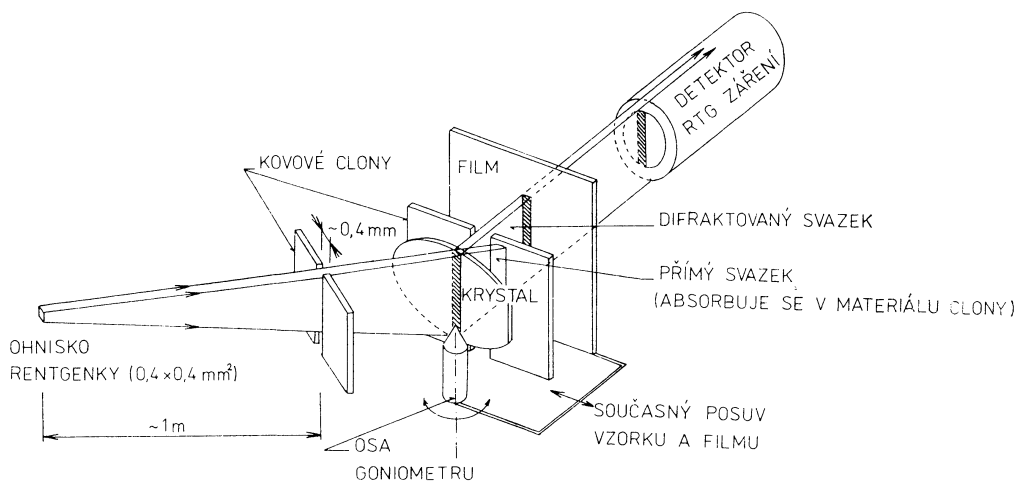
budou tmavší než jejich okolí. Tento závěr platí velmi dobře při zobrazování poruch v krystalech, u nichž se ještě výrazně neprojevuje absorpce rtg záření ( $\mu t < 1$ , kde  $t$  je tloušťka krystalu a  $\mu$  je lineární absorpční koeficient). V opačném případě, kdy  $\mu t \geq 1$ , závisí intenzita difrakce složitým způsobem na efektu anomální absorpce, přičemž jeho vliv je zmenšován deformací atomových rovin v okolí poruchy. Podrobnější informace o problematice vzniku kontrastu na mřížkových poruchách a o jeho zpětné interpretaci najde čtenář v [5].

Rentgenová topografie nezobrazuje tedy přímo samotné poruchy krystalové mřížky, a deformací pole, které vyvolá tato porucha ve svém okolí. Protože při záznamu topogramu na film jde o stínovou projekci poruch, rozhodují o rozlišovací schopnosti především geometrické faktory a spektrální složení záření. Běžně se dosahuje rozlišovací schopnosti několik mikrometrů.

Za 25 let existence rtg topografie vznikla celá řada variant jejího experimentálního uspořádání. Podrobněji si všimneme dvou: Langovy metody rentgenové topografie, a to z toho důvodu, že se nejčastěji užívá, a topografie na dvoukrystalovém difraktografu, protože tato metoda je až o dva řády citlivější na deformaci krystalové mřížky než metoda Langova. Výběr těchto metod pro podrobnější popis je též určen tím, že topogramy mřížkových poruch v křemíku, uvedené v další části tohoto článku, byly jimi získány.

## 2.1. Langova metoda rentgenové topografie

Schéma geometrického uspořádání Langovy metody je na obr. 2. Clonou se vymezí svazek rentgenového záření tak, že je široký jen několik desetin milimetru a vysoký

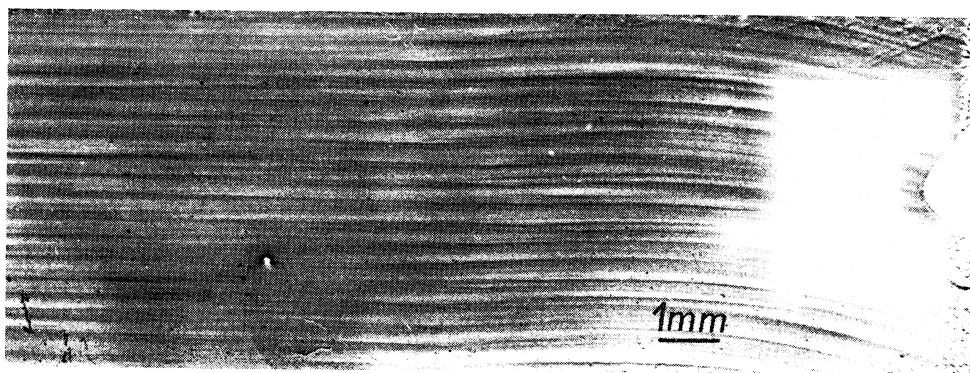


Obr. 2: Schéma geometrického uspořádání experimentu při expozici topogramu Langovou metodou.

(kolmo na rovinu difrakčních úhlů) až několik centimetrů, a to podle velikosti studovaného vzorku. Takový úzký svazek o divergenci 200 až 400  $\mu\text{rad}$  dopadá na krystal, který je upevněn v goniometru, aby s ním bylo možné pohybovat kolem dvou navzájem kolmých os, což je nutné k jeho nastavení do difrakční polohy. V ní zaznamená detektor nacházející se ve směru udaném Braggovou podmínkou maximum intenzity difraktovaného svazku. Bezprostředně za krystal se vkládá úzká štěrбина, která propustí jen difraktovaný svazek dopadající pak už přímo na film. Nosiče krystalu a filmu jsou upevněny na společném vozíčku, který se během expozice posouvá malou rychlostí (řádově 0,1 mm/min) tak, že primární svazek se posouvá po krystalu, čímž se postupně zachytí na fotografický film (speciální jemnozrná emulze) celý rentgenový difrakční obraz poruch v krystalu – rentgenový topogram.

## 2.2. Rentgenová topografie na dvoukrystalovém difraktografu

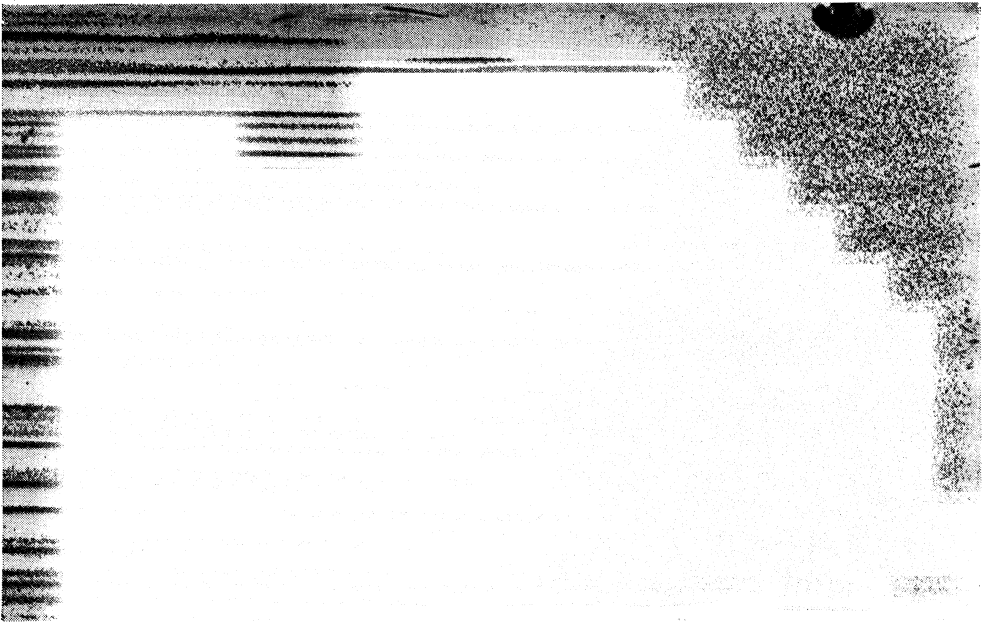
Základ tohoto uspořádání tvoří dva goniometry, z nichž první nese dokonalý monokrystal (bez poruch) mající funkci monochromátoru a kolimátoru rtg záření, které pak slouží jako primární svazek k difrakci na studovaném krystalu v druhém goniometru. Při tečném dopadu záření na první krystal a při difrakčním úhlu kolem  $45^\circ$  lze získat opticky značně dokonalý primární svazek dostatečně velkého průřezu (viz obr. 3).



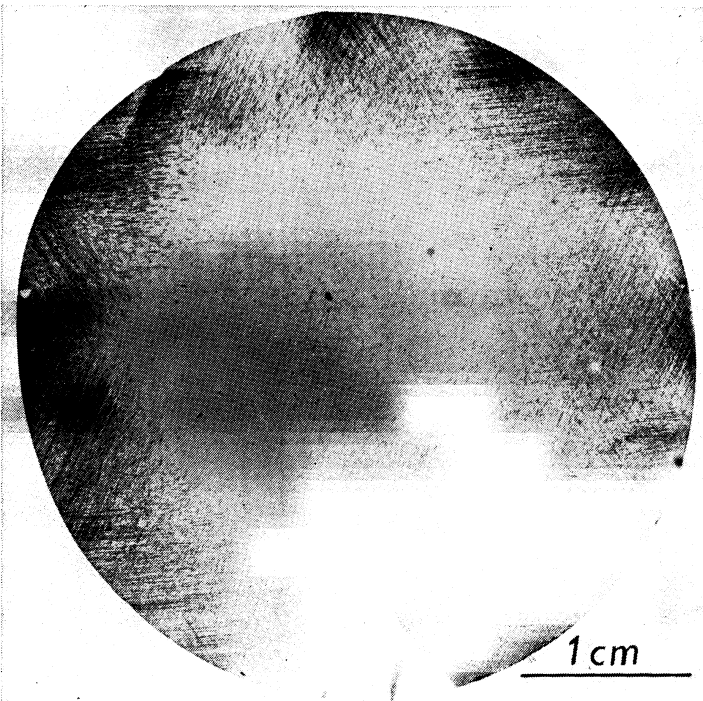
Obr. 5: Topogram (TRV) podélného řezu krystalem Si.



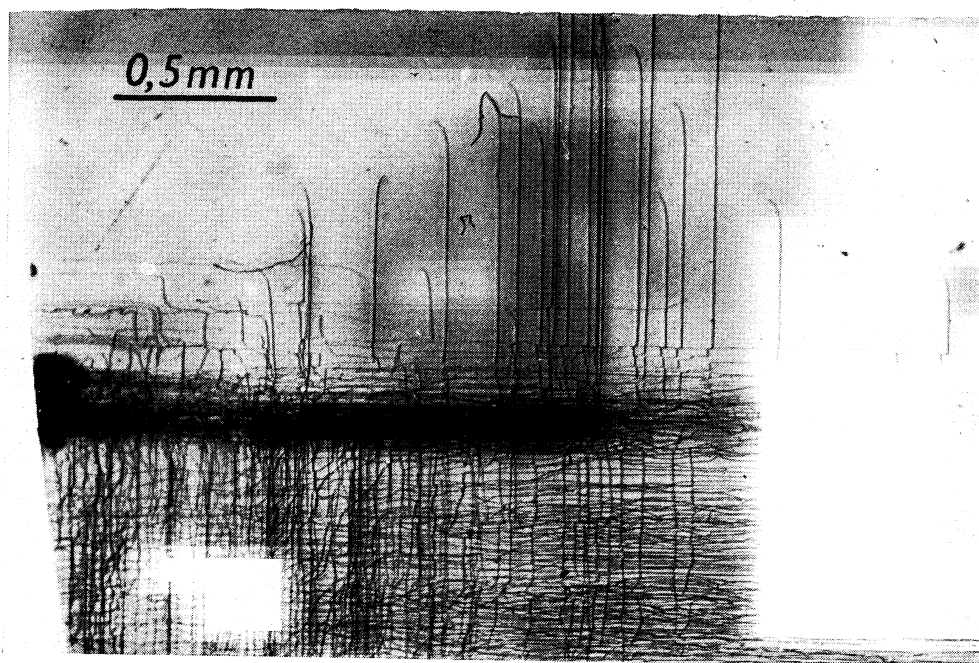
Obr. 6: Topogram (TRV) příčného řezu krystalem Si.



Obr. 7: Topogram (Langova metoda), podélného řezu krystalom Si(Cz), krystal žihán na teplotě 1050 °C po dobu 20 hod.

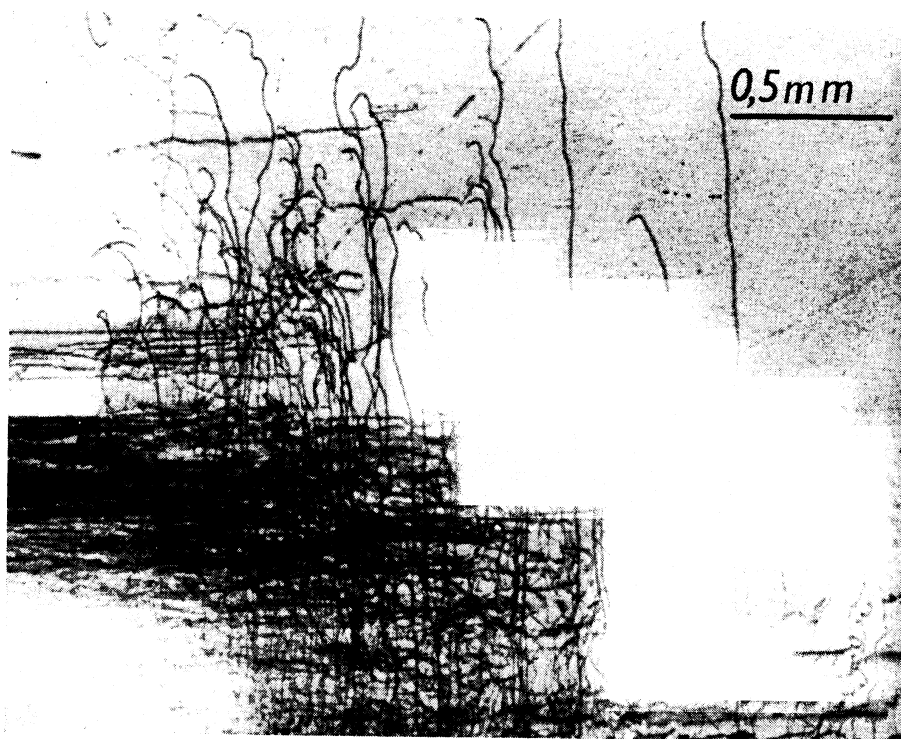


Obr. 8: Topogram (Langova metoda) celé Si desky po oxidaci v peci s teplotními gradienty,

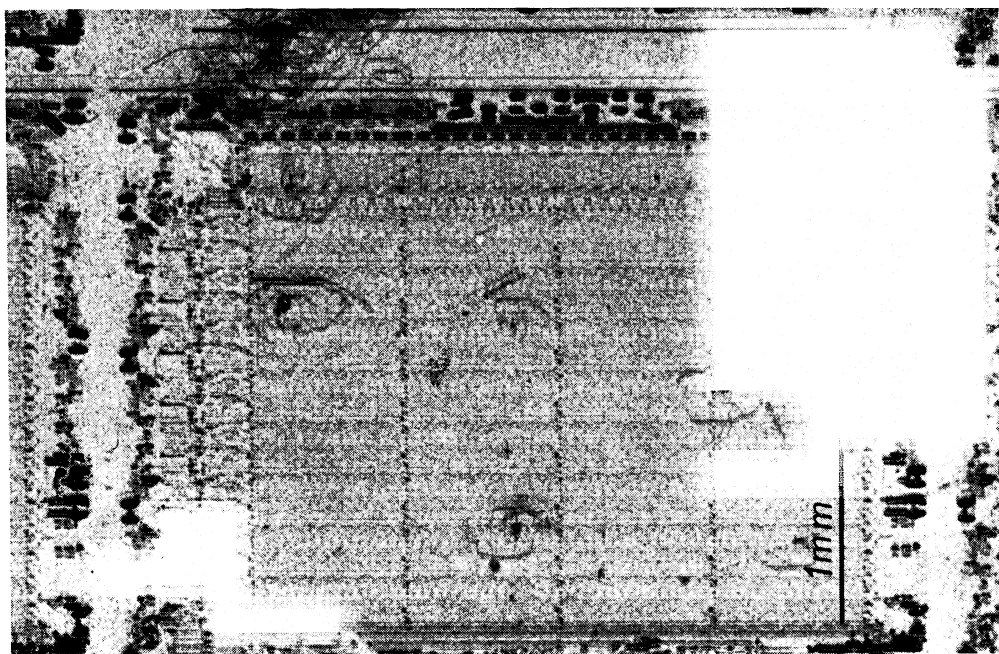


Obr. 9: Dislokační síť šířící se z porušeného okraje Si desky, Langova metoda.

Obr. 10: Dislokační síť uvnitř Si desky po proběhnutí celého výrobního cyklu, Langova metoda.

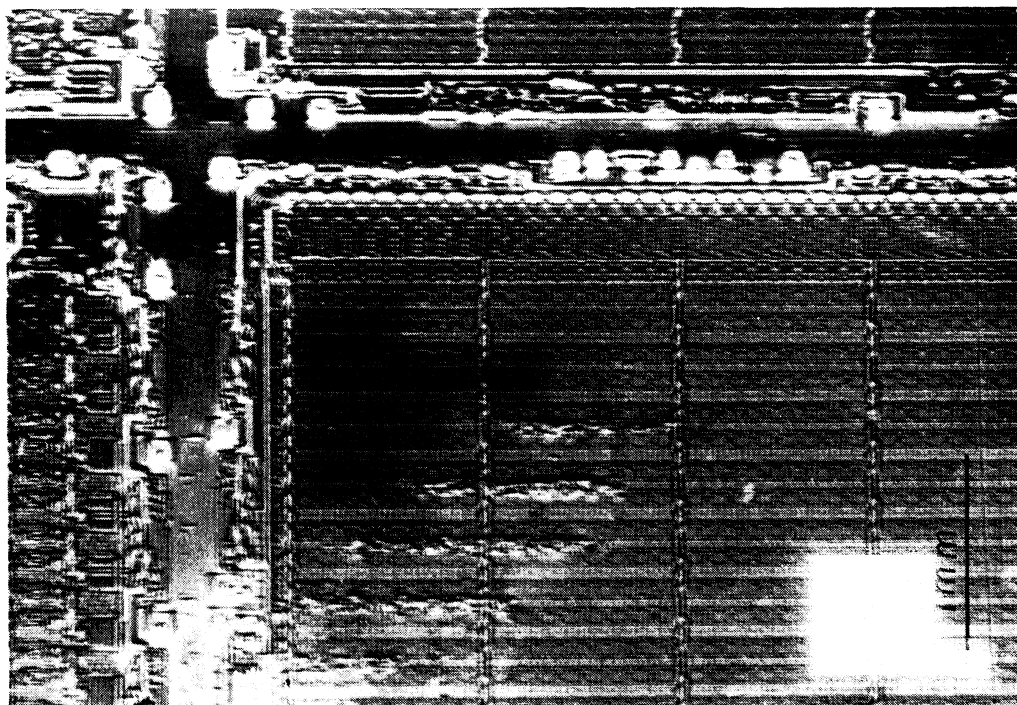


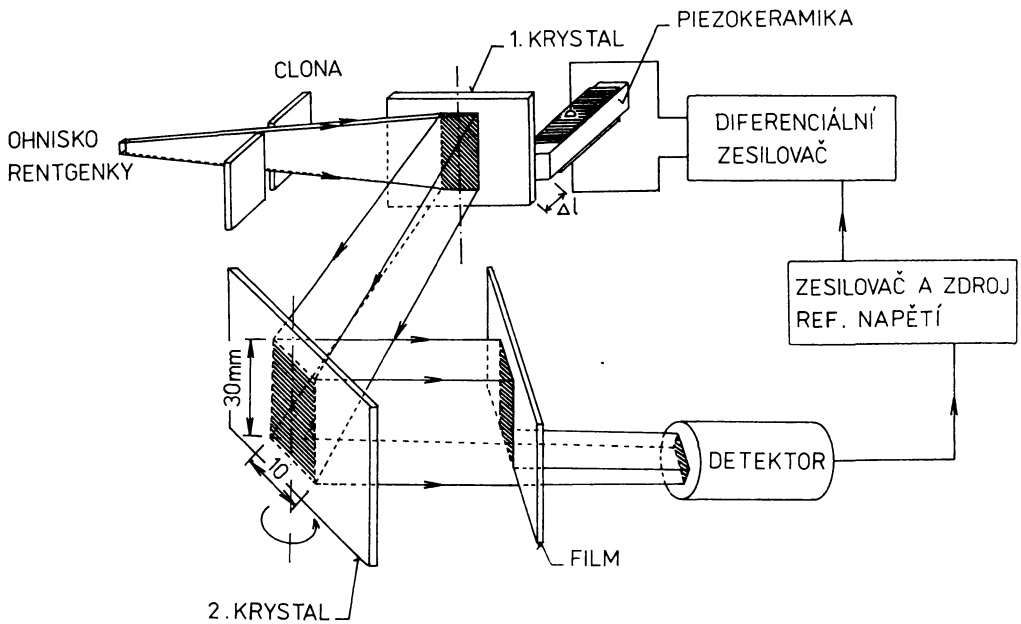




Obr. 11: Topogram (Langova metoda) jednoho celého čipu integrovaného obvodu: uvnitř funkční struktury jsou patrné dislokace v okolí precipitátů.

Obr. 12: Topogram (TRV) části Si desky s vytvořenou funkční strukturou integrovaného obvodu-oblast, kde se stýkají čtyři čipy.

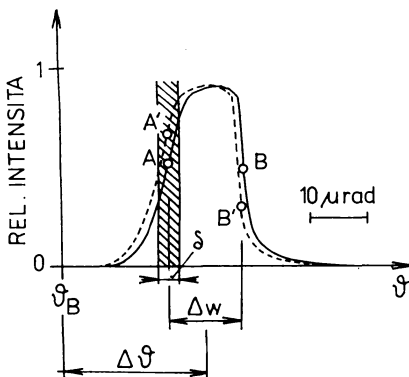




Obr. 3: Schéma geometrického uspořádání dvoukrystalového difraktografu při topografii v rovinné vlně s piezoelektrickou stabilizací teplotních změn úhlového nastavení krystalů.

Tento svazek je lineárně polarizovaný, monochromatický (jen jedna spektrální čára), a jeho divergence je jen několik jednotek mikroradiánu, tedy téměř rovinná vlna. Šířka reflexní křivky druhého krystalu je pak mnohem větší než divergence na něj dopadajícího svazku. Prakticky se dosahuje poměru 1 : 5 až 1 : 10.

Při expozici topogramu se druhý krystal nenastavuje do maxima intenzity difraktovaného svazku, ale přibližně do jeho poloviny (– viz bod *A* na obr. 4). Pokud je druhý krystal bez poruch, bude jeho topografický obraz homogenní šedé pole. Díky malé změně mřížkové konstanty nebo nepatrnému natočení atomových



Obr. 4: Reflexní křivka substrátu (plně) a lokální reflexní křivka (čárkovaně) s vyznačenými pracovními body.

rovin v okolí poruchy se reflexní křivka posune, a tím se v místě poruchy změní intenzita difraktovaných paprsků (bod  $A$  přejde v bod  $A'$  – viz obr. 4). Je zřejmé, že obraz uvažované poruchy by mohl být i světlejší než okolí, jestliže by krystal byl nastaven do bodu  $B$  na reflexní křivce.

Poloha reflexní křivky závisí též na úhlu  $\Delta\vartheta$  – optickém lomu rtg záření, který není zahrnut v Braggově podmínce. Změna úhlu dopadu paprsků na zvlněný povrch nebo leptový reliéf vede též k posunu reflexní křivky, a tedy i ke vzniku kontrastu na topogramu.

Největší citlivosti na zobrazování mřížkových poruch dosahuje tato metoda, jestliže difrakční úhly na obou krystalech jsou stejné a příslušné atomové roviny obou krystalů rovnoběžné. Zcela zřetelně se zobrazí místo, kde se reflexní křivka posune o  $10^{-1}\mu\text{rad}$ . Toto uspořádání je však stejně vysoce citlivé i na vzájemné úhlové nastavení obou krystalů, které je ovlivňováno kolísáním teploty v okolí goniometrů. Během expozice, která trvá desítky minut, by tyto změny naprosto znemožnily získání topogramu. Proto v naší laboratoři stabilizujeme vzájemnou polohu obou krystalů pomocí zpětnovazební smyčky [6], kterou tvoří detektor, jenž během expozice neustále měří intenzitu části difraktovaného svazku, zesilovač stejnosměrného napětí s referenčním zdrojem, diferenciální zesilovač a piezokeramika. Její dilatační změny vyvolané přivedeným napětím z diferenciálního zesilovače se přenášejí na natáčení prvního krystalu v takovém směru, aby změny intenzity vyvolané teplotní nestabilitou byly kompenzovány.

Obrazy poruch naexponované na takovém dvoukrystalovém difraktografu mají takový kontrast, jaký plyne z teorie difrakce rovinné vlny na studovaném krystalu. Proto se mluví i o topografii v rovinné vlně (TRV).

Poznámka:

- a) Topogramy označené v tomto článku (Langova metoda) byly exponovány zářením  $\text{Mo K}\alpha_1$ , difrakce 220 nebo 111.
- b) Topogramy označené (TRV) byly exponovány na dvoukrystalovém difraktografu zářením  $\text{Cu K}\alpha_1$  za těchto podmínek:  
První krystal Si, difrakce 333, úhel dopadu  $3^\circ$ ,  $\vartheta_B = 47^\circ$ , divergence difraktovaného svazku  $3\mu\text{rad}$ . Druhý krystal, studovaný vzorek Si, difrakce 333 nebo 511, šířka reflexní křivky 15 nebo  $33\mu\text{rad}$ .

### 3. Současná problematika mřížkových poruch křemíku a jejich zobrazení rentgenovou topografií

Dnešní průmyslově vyráběné monokrystaly křemíku jsou sice bezdislokační, avšak obsahují řadu mikroskopických poruch prostorově rozložených do růstových pásů. Na obr. 5\*) je topogram (TRV) podélného řezu krystalem Si (povrch vzorku rovnoběžný s osou růstu), na němž jsou zobrazeny růstové pásy. Tvar růstových pásů

\*) Obr. 5–12 jsou otištěny na křídové příloze uprostřed čísla.

sleduje čelo krystalizace při tažení krystalu z taveniny a v prostoru tvoří plochu přibližně odpovídající šroubovici, jejíž osa je totožná s osou růstu.

Růstové pásy vznikají v důsledku nerovnoměrného odvodu krystalizačního tepla z čela krystalizace [7]. Teplejší místa na rozhraní krystal – tavenina se sice rotací krystalu rozmývají ale přesto zanechávají v krystalu stopy. V této oblasti se mění efektivní rychlost růstu a ta vede k nerovnoměrnému rozložení příměsí, zejména nežádoucího kyslíku, kterým bývají monokrystaly vypěstované metodou Czochralského (tažení z taveniny) přesyceny tím více, čím větší je jejich průměr. Jeho průměrná koncentrace u krystalů  $\varnothing = 80$  mm bývá až  $2 \cdot 10^{18}$  at/cm<sup>3</sup>, ale napříč růstovými pásy kolísá až o  $\pm 50\%$ . Atomy kyslíku nejčastěji bývají v intersticiálních mřížkových polohách a s jejich koncentrací roste mřížková konstanta. Díky tomu má difrakční úhel  $\vartheta_B$  v jednotlivých místech různou hodnotu, dochází tedy k posuvu reflexní křivky, a tím k zobrazení růstových pásů.

Na obr. 6 je topogram (TRV) stejného krystalu jako na obr. 5, avšak tentokrát byl povrch vzorku kolmý na osu růstu. Tmavé a světlé pruhy sledující přibližně kruhový okraj vzorku odpovídají obrazům růstových pásů, které protínají jeho povrch. Toto specifické prostorové rozložení poruch vedlo k tomu, že se tyto poruchy mřížky souhrnně nazývají vírové (z angl. swirls). Proč zatím nedosažitelným cílem polovodičového průmyslu je vyrábět monokrystaly bez vírových poruch vyplne z dalšího výkladu.

Topogram na obr. 7 (Langova metoda) představuje topografický obraz podélného řezu krystalem Si(Cz), který byl žhán po dobu 20 hodin na teplotě 1050 °C v oxidační atmosféře. Růstové pásy (tentokrát nesahají až k okraji vzorku) mají zřetelně diskretní strukturu. Je to důsledek strukturní transformace, která proběhla uvnitř růstových pásů. Z výsledků jejich studia pomocí elektronové mikroskopie dnes víme, že černé body na topogramu odpovídají precipitátům SiO<sub>2</sub>, vrstevným chybám, případně jejich komplexům.

Lokalizace těchto strukturních transformací do růstových pásů má svoji příčinu už v samém počátku růstu monokrystalu. Přímé pozorování čela krystalizace pomocí rentgenové topografie napojené na televizní zobrazovací systém (pozorování „in situ“) ukázalo, že v blízkosti čela krystalizace jsou uvnitř krystalu ještě malé kapičky taveniny zcela obklopené krystalem [8]. Protože tavenina má asi o 10 % větší hustotu než krystal, je tuhnoucí kapička zdrojem přebytečných atomů Si nacházejících místo pouze v intersticiálních polohách krystalové mřížky Si. Při tuhnutí kapiček se nečistoty, jako jsou atomy C, Fe, Cu, Au aj., soustřeďují do jejich středů a vytvářejí tak zárodky pro budoucí precipitaci SiO<sub>2</sub>. Přebytečné atomy Si se během žhání transformují do vrstevných chyb a dislokačních smyček mikroskopických rozměrů.

Jak plyne z tohoto kapičkového modelu růstu bezdislokačních monokrystalů Si [8], nachází se takový monokrystal v termodynamicky nerovnovážném stavu, tzn., že při každé vysokoteplotní operaci (a těch bývá 5–10 během celého výrobního cyklu) dochází ke strukturní transformaci mikrodefektů.

Z topogramu na obr. 7 je ještě dobře patrný „čisticí efekt“ mřížkových poruch tzv. getrace. Volné chemické vazby na jejich povrchu na sebe dále adsorbují nečistoty, a proto je okolí růstových pásů vyčištěné od malých bodových poruch ve srovnání s oblastí mimo ně, kde jsou obrazy poruch rozloženy homogenně. Tuto getrační vlast-

nost má za jistých podmínek i oxidová vrstva, a proto „čisté“ oblasti krystalu nacházíme kolem dokola při okraji vzorku. Kromě tohoto getračního efektu využívají světoví výrobci ještě getrace pomocí poruch krystalové mřížky uměle zavedených do zadní strany Si desky pomocí ozáření výkonovým laserem, implantací iontů vzácných plynů nebo prostým poškrábáním zadní strany diamantovou jehlou [10].

Přesycení bezdislokačních monokrystalů Si vlastními intersticiály je příčinou anomálních difúzních efektů vznikajících v důsledku toho, že atomový mechanismus difúze neprobíhá po vakancích, jak je tomu u kovů, ale po vlastních intersticiálech [9].

Při výrobě integrovaných obvodů se vytvářejí na Si desce tenké oxidové a difúzní vrstvy, které v ní vyvolávají mechanické pnutí. Příčinou jeho vzniku jsou rozdílné koeficienty tepelné roztažnosti Si a  $\text{SiO}_2$  a u difúzních vrstev je to změna mřížkové konstanty úměrná koncentraci nadifundovaných atomů. Připočteme-li k těmto příčinám ještě teplotní gradienty při žíhání v peci, není divu, že při některé z těchto operací překročí pnutí mez elastické deformace a nahromaděné pnutí se uvolní tím, že vzniknou dislokace. Mezi kritická místa, v nichž vznikají dislokace nejčastěji, patří okraj Si desky, okraje izolačních oxidů, rozhraní difúzních vrstev (emitorové dislokace) a vnitřní precipitáty  $\text{SiO}_2$ .

Na obr. 8 je topogram (Langova metoda) celé Si desky  $\varnothing = 38$  mm, která prošla oxidací v peci s nehomogenním rozložením teploty. Je vidět, že z okrajů Si desky se uvolnilo velké množství dislokací, které se pohybovaly ve skluzových rovinách (111) a uspořádaly se tak do pásů majících směr  $\langle 110 \rangle$ .

Jemná síť dislokačních čar, které rovněž vznikly na okraji Si desky s povrchem (100) v důsledku tepelných gradientů, je patrná z obr. 9 (Langova metoda). Dislokační čáry se vzájemně protínají a při výstupu na povrch se charakteristickým způsobem zakřivují.

Na obr. 10 je topogram (Langova metoda) Si desky s povrchem (100), na níž byla vytvořena celá funkční struktura integrovaného obvodu. Ta byla ale před expozicí topogramu chemicky sleptána, aby nerušila obraz dislokací ležících pod ní. Na rozdíl od obr. 9 jsou zde dislokace různě zprohýbány, jakoby při pohybu ve skluzové rovině narážely na nám neviditelné překážky. Pomocí transmisní elektronové mikroskopie lze ukázat, že těmito překážkami jsou jemné precipitáty.

Pokud precipitát doroste do větší velikosti, je jeho rozpínání tak silné, že se může stát zdrojem dislokací, jehož činnost je ještě podporována dalšími pnutími, která mají příčinu v oxidových a difúzních vrstvách a teplotních gradientech.

Na obr. 11 je topogram (Langova metoda) jednoho čipu integrovaného obvodu, jehož funkční struktura není na topogramu rozlišena (čip obsahuje více než 6000 tranzistorů). Na tomto topogramu jsou ale dobře patrné velké precipitáty a dislokační čáry v jejich okolí. Tam, kde dislokační čáry prostupují funkční strukturou, stačí, aby vyřadily po elektrické stránce jeden z tisíců tranzistorů a tím i celý integrovaný obvod. Na obr. 12 je topogram (TRV) funkční struktury stejného integrovaného obvodu jako na předešlém topogramu. Je vidět, že funkční struktura je porušena dislokacemi vystupujícími zde na povrch. Je pozoruhodné, že v optickém mikroskopu bychom žádnou změnu na povrchu čipu nepozorovali. Je to dáno tím, že opticky se zobrazuje jen povrchový reliéf, zatímco rentgenová topografie zobrazuje ta místa, kde nastala porucha přísné periodicity krystalové mřížky.

#### 4. Závěr

Rentgenová topografie má nyní už své stálé místo při studiu poruch krystalové mřížky a vhodně doplňuje jiné metody. Její přednosti záleží v tom, že je značně citlivá i na velmi malé deformace krystalové mřížky a že dokáže zobrazit poruchy ležící nejen při povrchu, ale i jejich rozložení v celém objemu vzorku. Další její velkou předností je i to, že na vzorek nepůsobí destruktivně, takže pomocí ní lze sledovat i vývoj mřížkových poruch během jednotlivých technologických operací, a to stále na stejném vzorku.

Studium mřížkových poruch křemíku, zejména jejich strukturních transformací během vysokoteplotních operací a jejich korelace s elektrickými parametry  $p-n$  přechodů, jsou v současné době středem zájmu všech výrobců integrovaných obvodů. Impulsem k zintenzívnění výzkumu fyzikálních vlastností mřížkových poruch v Si však jsou i překvapivé efekty, které s sebou nese tak čistý a dokonalý materiál, jako je monokrystalický křemík.

#### Literatura

- [1] BLOCH E.: Semiconductor Silicon 81, edited by H. R. HUFF, R. J. KRIEGLER, Y. TAKEISHI. Proceedings Volume 81—5. The Electrochem. Society, INC., Pennington USA, 1981, str. 20.
- [2] LAUE M. VON: *Röntgenstrahlinterferenzen*. Akad. Verlags gesellschaft, Frankfurt 1960.
- [3] TAKAGI S.: J. Phys. Soc. Japan 26 (1969), 1239.
- [4] HOLÝ V.: Phys. Stat. Sol. (b) 101 (1980), 575.
- [5] FIEDLER R., POLCAROVÁ M.: Čs. čas. fyz. (A) 25 (1975), 241; TANNER B. K.: *X-ray Diffraction Topography*, Pergamon Press, 1976.
- [6] KUBĚNA J.: Sborník 7. konf. čs. fyziků, Praha 24.—28. 8. 1981, část 1, svazek 2, č. příspěvku 05—03, vydala Fyzikální vědecká sekce JČSMF 1981.
- [7] HU S. M.: J. Vac. Sci. Technol. 14 (1977), 17.
- [8] CHIKAVA J., YOSHIKAWA S.: Solid State Technol. 23 (1980), 65.
- [9] GÖSELE U., FRANK W., SEEGER A.: Appl. Phys. 23 (1980), 361.
- [10] PEARCE C. W., KATZ L. E., SEIDEL T. E.: Semiconductor Silicon 81, edited by H. R. HUFF, R. J. KRIEGLER, Y. TAKEISHI, Proceedings Volume 81—5 The Elektrochem. Society, INC., Pennington USA, 1981, str. 705.

# vyučování

znamená rozšiřovat tuto oblast, zvětšovat ji.

VYUČOVÁNÍ MATEMATICE\*)

Abe Shenitzer, Ontario

Každý z nás máme v daném časovém okamžiku jakousi vlastní realitu, tajnou říši chápání a porozumění. Učit někoho

\*) ABE SHENITZER: *Teaching Mathematics. Mathematics Tomorrow*, Springer-Verlag, 1981. Překlad je pořízen z verze otištěné v časopisu The Mathematical Intelligencer, Vol. 3, No 3, 1981

© Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1981

Přeložila BLANKA KUSSOVÁ