

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Martin Setvák

Implantace iontů do pevných látek

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 22 (1977), No. 6, 330--336

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139036>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1977

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>

Implantace iontů do pevných látek

Martin Setvák, Praha

1. Úvod

Energetický atom, tj. atom s dostatečnou rychlostí při dopadu na povrch pevné látky vniká do pevné látky a po proběhnutí určité dráhy, která je úměrná energii atomu, se tento atom zabrzdí, zastaví, podobně jako projektil střelné zbraně. Na tomto principu se zrodila nová technologie vnášení žádoucích příměsí do tenkých vrstev pevných látek, kterou nazýváme iontová implantace. Po dopadu na povrch látky a při jeho dalším brzdění již není podstatné, zda energetický atom měl elektrický náboj nebo byl neutrální, protože hned při prvních srážkách s atomy látky se tento náboj může ztratit nebo opět získat. Název iontová implantace se užívá proto, že udělení vhodné energie, tvaru a čistoty svazku atomů dopadajících na terč se dá snadno provést metodami dobře známými z atomové fyziky tak, že udělíme atomům vhodný elektrický náboj, vytvoříme tedy ionty, které se dají urychlovat, filtrovat a tvarovat do svazků ve vhodných elektrických a magnetických polích.

2. Historický přehled

Při studiu měsíčních hornin se zjistilo, že povrch hornin byl po celou dobu existence bombardován rychlými částicemi vesmírného původu, které vnikly do povrchových vrstev hornin. Po uvedení do chodu prvních urychlovačů částic v laboratořích jaderné fyziky v třicátých letech našeho století, byly pozorovány změny vlastností ostřelovaných ploch, ať již to byly stěny vakuové komory nebo ostřelované terče. Problém se stal vážnějším po uvedení do provozu prvních jaderných reaktorů ve čtyřicátých letech našeho století. V současné době se tento problém stal jedním z hlavních zdrojů potíží při vývoji zařízení pro využití termojaderné energie. Stěny vakuové nádoby tokamaků a podobných zařízení jsou bombardovány velkými dávkami částic, které pronikly stěnami magnetické nádoby a způsobují vytváření „puchýřů“, které postupně praskají, odlupují se a postupně znehodnocují stěny nádoby. To je však jen jedním z mála příkladů, kde je iontová implantace nežádoucí. V padesátých letech našeho století byly provedeny experimenty které prokázaly, že se vlastností některých polovodičových prvků zlepšily po bombardování ionty, to se však interpretovalo jen jako následek změny krystalické struktury použitých polovodičů následkem „zhuštění“ materiálu. Začátkem šedesátých let našeho století byly publikovány první práce, které již rozlišovaly změny vlastností ostřelovaných látek následkem příměsí nastřelované látky a následkem poškození základního materiálu, ke kterému dochází při brzdění rychlého atomu vyražením a přemísťováním atomů v krystalech z jejich stabilních poloh. V průběhu posledních deseti let se iontová implantace dostala ze stadia laboratorních experimentů do stadia

masové výroby polovodičů jako nový technologický proces obohacování základního materiálu žádoucími příměsemi. Kromě tohoto základního použití, které způsobilo rychlý rozvoj přístrojové techniky iontové implantace, našla technika bombardování povrchu pevných látek celou řadu dalších aplikací v různých oblastech vědy a techniky.

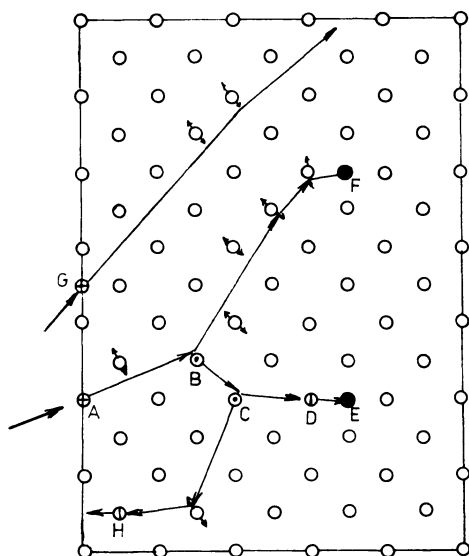
3. Interakce energetických iontů s pevnou látkou

Urychlený iont (atom) s energií keV až stovky keV při dopadu na povrch pevné látky vniká do pevné látky a zpomaluje se následkem srážek s atomy látky, která může být amorfnní nebo krystalická. Hĺoubka vniku závisí na energii a hmotnosti nastřelovaného iontu a na hmotnosti terče. Tak např. při nastřelování lehkého bóru do SiO_2 s energií 100 keV je dosah asi 370 nm, s energií 10 keV je dosah 37 nm. Při nastřelování vizmutu do téže podložky s energií 100 keV je dosah 40 nm, s energií 10 keV je dosah 8 nm. Ztrátu energie iontu způsobují hlavně dva srážkové procesy, elektronové a jaderné brzdění. Při elektronovém brzdění se předává energie mezi elektrony letícího a terčového atomu. Je to proces nepružný, protože se část energie spotřebuje na ionizaci a excitaci atomů, část energie může být elektronům předána ve formě energie kinetické. Při těchto srážkách se předává jen malá část energie letícího iontu a tento iont se jen nepatrně vychyluje ze své původní dráhy. Tento proces převažuje u vysokých energií iontů.

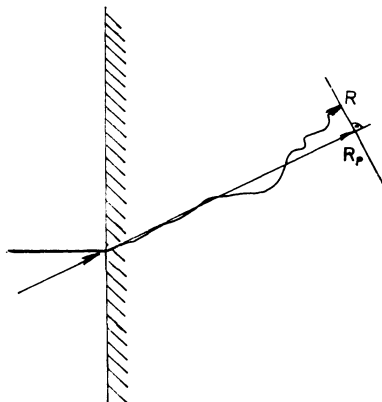
Jaderné brzdění je způsobené silnými elektrostatickými interakcemi mezi jádry letícího a terčového atomu. Při průletu letícího atomu ve větší vzdálenosti kolem terčového atomu se letící atom odchýlí od svého původního směru a atom terče se rozkmitá. Při průletu v malé vzdálenosti nebo čelné srážce změní letící atom podstatně původní směr nebo je odražen zpět, atom terče může být vyražen ze své stabilní polohy. Při poklesu energie letícího iontu na hodnotu asi 1 keV je střední volná dráha letícího iontu rovna přibližně vzdálenosti atomů terče a srážky jsou velmi časté. Při poklesu energie iontu na hodnotu asi 20 eV se iont zastaví buď v poloze intersticiální, tj. v prostoru mezi atomy neporušené krystalické mříže nebo vyražením atomu mříže ze stabilní polohy zaujme jeho místo, zastaví se v poloze substituční. V některých případech, např. při implantaci aktivních příměsí do polovodičů, je nutné, aby tyto ionty zaujaly substituční polohu. Proto v těch případech, kdy implantované atomy mají tendenci zaujmout polohu převážně intersticiální, je nutno je dodatečně přemístit do stabilních substitučních poloh. To se děje dodatečným žiháním vzorků při teplotách až kolem 700 °C. Tím se odstraní i poruchy krystalu způsobené brzděním iontu, např. amorfizace povrchu při vyšších dávkách. Na obr. 1 je znázorněn příklad brzdného procesu energetického atomu v plošném schématu krystalové mříže. Nastřelený atom A se srazí při svém pohybu s atomem krystalu B, rozkmitá několik atomů slabými interakcemi a zastaví se v intersticiální poloze F. Atom z polohy B je vyražen ze své stabilní polohy, sám vyrazí atom z polohy C, dále vyrazí atom D a zaujme jeho místo. Atom z polohy D se zastaví v intersticiální poloze E. Po přemístění atomu B tam zůstane prázdné místo – vakance, rovněž tak v místě atomu C, který předá svoji energii atomu H, zaujme jeho místo a atom H je vyražen z krystalu, odprášen. Atom G dopadá na povrch krystalu téměř ve směru

nízkoindexové krystalické osy a dochází k tzv. jevu kanálování, kdy je dosah větší než u ostatních.

Důležitou veličinou je dolet nebo dosah iontů v pevné látce (obr. 2). Skutečná brzdná dráha iontu se nedá zjistit a je pro každý iont soubor se stejnými parametry jiná. Praktický význam má tzv. promítnutý dosah R_p , to je průmět koncového bodu dráhy do směru iontu před dopadem. Dosahy velkého počtu iontů tvoří statistický soubor s rozdělením blízkým rozdělení Gaussovu (obr. 3).



Obr. 1. Příklad brzdného procesu atomu v plošném schématu krystalové mříže
A — nastřelený atom; B, C — vakance; H — odprášený atom; E, F — intersticiály; G — kanálový atom.



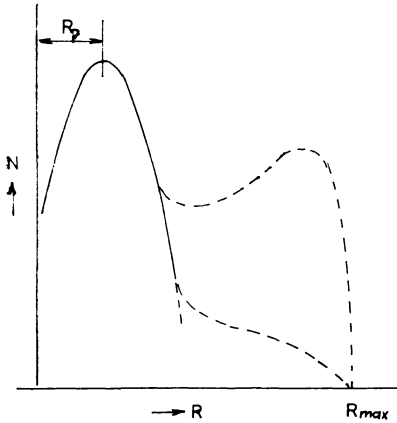
Obr. 2. Dosah (dolet) iontu
R — koncový bod doletu atomu,
 R_p — promítnutý dolet. Vzdálenost R_p , R představuje boční, laterální úchylku iontu pod maskou.

Dosah iontů R_p byl v roce 1963 teoreticky zpracován autory LINDHARD, SCHARFF, SCHIOTT a na základě toho byly podle této „LSS“ teorie zpracovány rozsáhlé tabulky pro všechny kombinace nastřelovaných iontů a podložek pro různé energie [1]. V současné době je již publikován dostatečný počet experimentálních výsledků, které umožňují srovnání teoretických předpovědí s naměřenými výsledky. Přesnost dosahů u homogenních terčů je asi $\pm 5\%$.

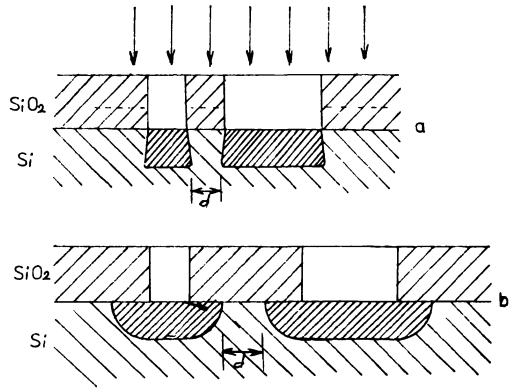
4. Přehled použití iontové implantace

Nejrozšířenějším použitím této technologie je implantace příměsí, tj. donorů a akceptorů do polovodičů. Tento způsob vnášení žádoucích příměsí se používá buď v kombinaci s existující technologií difúze nebo samostatně při výrobě náročných polovodičových prvků a integrovaných obvodů.

Iontová implantace má ve srovnání s klasickou metodou difúze řadu výhod, které ji zařadily k této technologii jako vhodný a v řadě případů nepostradatelný doplněk při výrobě nejnáročnějších polovodičových prvků a integrovaných obvodů. V první řadě je to okolnost, že je možno implantovat jakýkoli prvek do jakékoli podložky při libovolné teplotě a v libovolné koncentraci i nad mezí rozpustnosti daného prvku v podložce, tj. je možná i supersaturace. Dávkování a homogenita implantace po celé ploše



Obr. 3. Hloubkový profil implantovaných příměsí. Plnou čarou je vyznačen tvar profilu při „amorfní“ implantaci, čárkovane jsou vyznačeny dva příklady vlivu kanálování.



Obr. 4. Srovnání iontové implantace a difúze do Si přes okénka v masce z SiO_2 stejných rozměrů. Hustě šrafované jsou obohacené oblasti v Si, mezi kterými musí být zachována určitá minimální vzdálenost. a — implantace, b — difúze

terče se dají provést s přesností kolem jednoho procenta, což je podstatně lepší než u klasických metod. Této vlastnosti se využívá v kombinaci s difúzí, kde se potřebné příměsi naimplantují s velkou přesností do mělké vrstvy pod povrchem a pak se rozdifundují do velkých hloubek, do kterých by implantaci nebylo možné provést. Dosah iontů pod povrchem terče se dá snadno měnit změnou energie iontů a dá se předem dost přesně stanovit z tabulek. Hloubkový profil prvku implantovaného při jedné energii má gaussovský tvar a implantací při několika energiích a dávkách je možno vytvořit libovolný tvar hloubkového profilu. Na rozdíl od difúze, kde se příměsí pohybují v daném materiálu všemi směry, tedy i „zalézají“ pod masku, při implantaci je laterální pohyb podstatně menší (obr. 4). Tak např. při implantaci bóru do křemíku v rozmezí energií 50 až 200 keV je laterální pohyb asi 15° . Tato vlastnost iontové implantace umožňuje snižování rozměrů prvků integrovaných obvodů, snižování parazitních kapacit obvodů, zvyšování spínacích rychlostí spínacích prvků a zvyšování vysokofrekvenční meze tranzistorů. Implantované desky jsou v dobrém vakuu, které spolu s přesným dávkováním snižuje vliv lidského činitele a podstatně zvyšuje výtěžnost výroby, takže i při vysoké ceně zařízení je při velkých sériích cena výrobků nižší. Iontovou implantací byly např. vyrobeny obvody kapesních kalkulaček, elektronických náramkových hodinek, paměťové prvky počítačů apod.

Jako každá nová technologie má i tato řadu nevýhod, které omezují její použití. V první řadě je to poškození krystalové struktury při vyšších dávkách, tendence některých příměsí usadit se v intersticiální poloze, kde nemohou být elektricky aktivními. Oba tyto jevy se většinou dají odstranit dodatečným žíháním, ne však ve všech případech. Průnik implantovaných příměsí je u běžně používaných zařízení asi do 1 mikrometru pod povrchem, což je v některých případech nedostačující. V tom případě je nutno použít dodatečně difúze. Pro některé aplikace mimo obor polovodičů, např. při studiu supravodivosti tenkých vrstev, koroze, otěru apod. jsou požadovány takové dávky, aby počet naimplantovaných atomů byl několik procent základního materiálu. Pro tyto účely se dají použít implantátory s proudy ve svazku řádu mA, protože u většiny normálních zařízení by trvala implantace jedné desky i několik dní.

Při bombardování povrchu pevné látky těžkými ionty s nízkými energiemi řádu keV dochází na celé brzdné dráze letícího atomu k intenzivnímu přemísťování atomů terče. Jestliže bombardujeme povrch pevné látky pod malým úhlem, proběhne celý brzdný proces v malé hloubce pod povrchem. V tomto případě značná část atomů povrchových vrstev může získat takovou kinetickou energii, že se utrhne od základního materiálu a vyletí do prostoru. Tomuto procesu říkáme iontové odprašování. V praxi se pro bombardování používá zpravidla inertních plynů, např. argonu, odprášené částice tvoří směs atomů a molekul neutrálních a kladně i záporně nabitých iontů. Počet odprášených částic na jeden iont dopadající, charakterizovaný koeficientem odprašování, se značně liší pro různé prvky a dociluje maximálních hodnot až řádu deset. Tohoto efektu se využívá k mechanickému opracování povrchu terče na broušení, tvarování nebo leštění povrchu. Iontového svazku se např. použilo pro dobroušení – parabolizaci – optického zrcadla [2]. Svazek iontů 50 keV/100 μ A byl zfokusován na průměr 3 mm a programově odstraňoval povrch skla ve formě spirály. Zrcadlo o průměru 10 cm se při tom otáčelo, celková doba expozice byla 11 hodin. Odchylka od teoretického paraboloidu na hotovém výrobku byla 0,046 vlnových délek při délce vlny 550 nm. Touto technologií byly např. ztenčovány vzorky měsíčních hornin při jejich analýze v transmisním elektronovém mikroskopu z tloušťky 10 μ m na tloušťku asi 10 nm.

Provedením hmotové analýzy odprášených iontů získáme informaci o hmotovém složení pevné látky. Na tomto principu je založena metoda hmotové analýzy známá pod označením SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry), která se již ve vědě i v průmyslu značně uplatnila a ve světě již existuje řada výrobců těchto zařízení. Touto metodou je např. možno měřit hloubkový profil koncentrace implantované příměsí v tenké vrstvě. Metoda záleží v tom, že se povrch vyšetřovaného vzorku postupně odprašuje iontovým bombardováním, odprášené ionty se systémem elektrod zfokusují tak, aby proletěly kvadrupólovým hmotovým analyzátozem, který na zapisovači nakreslí průběh koncentrace sledovaného prvku v závislosti na hloubce prvku pod povrchem pevné látky. Poměrné zastoupení jednotlivých zjištěných prvků ve sledovaném vzorku je velmi obtížné, protože koeficient odprašování jednotlivých prvků se liší až o několik řádů a každý prvek má jinou schopnost vytvářet kladné nebo záporné ionty při tomto procesu. Zdokonalováním této metody se intenzivně zabývá mnoho pracovišť na celém světě.

Jiná podobná metoda je založena na rozptylu odražených lehkých iontů. Metoda záleží v tom, že se povrch pevné látky bombarduje ionty vodíku nebo hélia s energiemi

řádu 100 keV až několik MeV a v určitém úhlu se měří energie odražených primárních iontů. Tato metoda dává informaci o kvantitativním zastoupení zjištěných prvků v terči. Tato technika se osvědčila při prvních analýzách složení měsíčních hornin sondou Surveyor, kde jako primárních energetických iontů bylo použito paprsků alfa vyzařovaných preparátem curia 242, s energií 6,11 MeV [3].

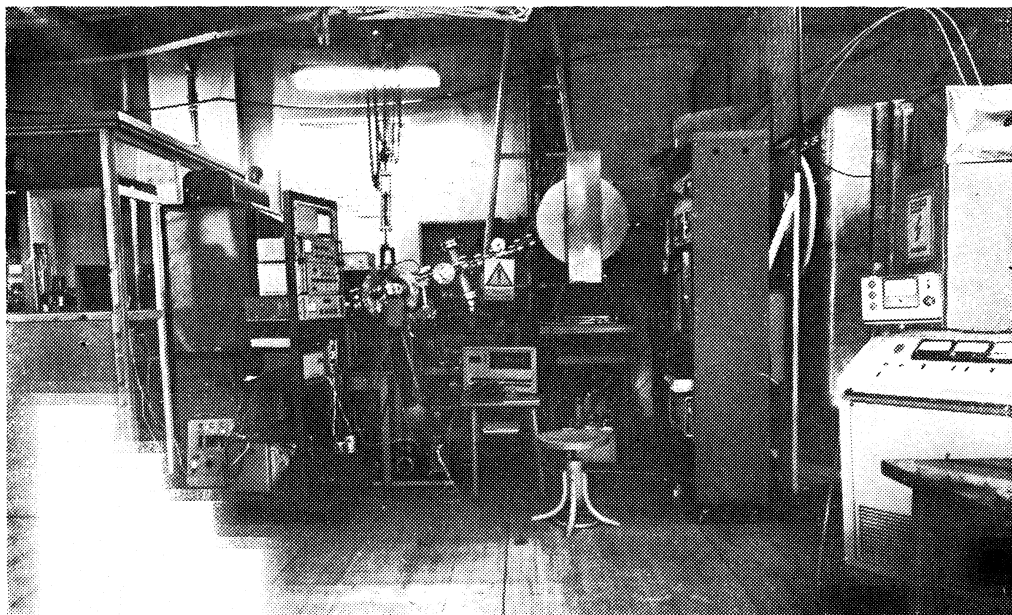
Podobná metoda, kde se místo energetického analyzátoru použije fotografická deska nebo stínítko, dává informaci o krystalické struktuře vzorku; nazýváme ji protonografií. Jestliže využijeme efektu kanálování a bombardujeme krystal ve směru některé nízkoindexové osy, můžeme získat i informace o tom, zdali jsou příměsi v krystalu v poloze intersticiální nebo substituční. Podobné informace můžeme získat i tím, že do krystalu naimplantujeme nějaký radioaktivní prvek a registrujeme zplodiny rozpadu. Této metodě říkáme metoda blokování, protože geometrické uspořádání atomů krystalu v řadách v různých směrech různě „blokuje“ výstup částic rozpadu na povrch pevné látky a na stínítku rovněž vytvoří charakteristické obrazce, z kterých je možno přímo určit krystalickou strukturu vzorku [4].

5. Přístrojová technika

Základními prvky přístrojů pro všechny aplikace iontových svazků jsou přístroje a zařízení již dlouhou dobu známé v laboratořích jaderné fyziky, upravené pro toto použití. Je to jednak iontový zdroj, který vytváří ionty požadovaného prvku, ionty z těchto zařízení vystupují zpravidla s energiemi několik keV a je nutno je dále urychlit až na energii řádu 100 keV. Iontový svazek obsahuje vždy kromě žádaného prvku i další ionty atomové a molekulární a tyto ionty se musí odstranit v hmotovém separátoru, kde se nejčastěji používá klasický magnetický separátor, který se umístí buď za urychlovačem, nebo ještě před ním. Iontový svazek se těsně před dopadem na terč ještě rozmítá podobně jako elektronový svazek na obrazovce televizoru, aby byl vzorek bombardován po celé ploše rovnoměrně. Iontový svazek se musí po celé dráze pohybovat v dobrém vakuu, a proto je součástí každé aparatury složitá soustava čerpacích zařízení. Většina průmyslových zařízení pro iontovou implantaci má energetický rozsah iontů ve svazku v rozmezí asi 20–200 keV a proudy v rozmezí desítky μA až několik mA. V průmyslově vyspělých státech je v současné době již celá řada specializovaných výrobců těchto zařízení s celkovou roční produkcí asi sto zařízení, celkový počet zařízení ve světě je již několik set. Cena jednoho zařízení je kolem čtvrt milionu dolarů. Na obr. 5 je fotografie prvního čs. zařízení pro iontovou implantaci vybudovaného na katedře elektroniky fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské v Praze, které bylo uvedeno do provozu začátkem roku 1974 [5].

6. Závěr

Iontová implantace se během několika let dostala ze stadia laboratorních experimentů do masové výroby polovodičů a začíná se úspěšně využívat v celé řadě dalších oborů



Obr. 5. Zařízení pro iontovou implantaci vybudované na katedře fyzikální elektroniky fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze

vědy a techniky jak v oblasti technologie, tak i v oblasti měřicí techniky. Pracovníci fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské v Praze ve snaze pomoci zavedení této nové technologie na čs. vědeckých a průmyslových pracovištích i s cílem vychovávat nové odborníky v tomto oboru vybudovali vlastní experimentální zařízení pro iontovou implantaci s parametry srovnatelnými s výrobky zahraničních výrobců a provádějí implantaci pro potřeby našeho průmyslu do doby, než si tato pracoviště opatří vhodná průmyslová zařízení tohoto druhu. Podobně bylo vybudováno i zařízení pro hmotovou analýzu povrchu pevných látek. Ověřováním dalších aplikací, zdokonalováním této technologie, poskytováním konzultací a výchovou studentů se pomáhají vytvářet vhodné podmínky pro rychlý rozvoj této technologie v čs. průmyslu. Vytváří se tak i příkladná spolupráce vysoké školy s průmyslem.

Literatura

- [1] J. F. GIBBONS, W. S. JOHNSON, S. W. MYLROIE: *Projected Range Statistics — Semiconductors and Related Materials*. Wiley, 1975.
- [2] NARODNY, TARASEVITCH: *Paraboloid Figured by Ion Bombardment*. Appl. Optics, Vol. 6., No 11, 1967.
- [3] C. A. ANDERSEN: *Microprobe analysis*. Wiley, 1973.
- [4] Č. JECH: *Interakce energetických atomů v pevných látkách*. Studie ČSAV, Academia 1974.
- [5] M. SETVÁK, J. KRÁL, Z. HŮLEK, L. PÍNA, A. ČAKO: *An experimental equipment for ion implantation*. Proc. of the 4th International Conference on Ion Implantation in Semiconductors and Other Materials, Osaka 1974, Edit. by S. NAMBA, Plenum Press, New York, 1975.