

Príprava a analýza diamantovej štruktúry

Michniak Pavol · Elektrotechnika, Študentské práce

14.03.2012



Diamantové štruktúry majú obrovský potenciál využitia v budúcnosti v rôznych oblastiach vedy a priemyslu. Tento článok sa zaoberá vlastnosťami diamantov, stručne rozoberá základné metódy prípravy diamantov s dôrazom na technológiu HF CVD (Hot Filament Chemical Vapour Deposition). V príspevku je popísaný postup prípravy diamantových vrstiev s ohľadom na reaktor, kde sa vytvárajú diamantové vrstvy na kremíkovom substráte. Vytvorené vzorky boli analyzované metódami SEM, SIMS, XRD a Ramanovou spektroskopiou.

1. Úvod

Diamant má odpradáva vysokú cenu hlavne pre jeho zriedkavosť a výnimočné vlastnosti. Dodnes je symbolom bohatstva a prestíže. Názov diamant pochádza z gréckeho slova adamas, čo znamená nezničiteľný. Okrem toho, že diamanty sú príťažlivé ako drahokamy, vyznačujú sa tiež pozoruhodnými fyzikálnymi vlastnosťami.

Atómy uhlíka môžu vytvárať chemické väzby s ďalšími štyrmi atómami, čo spôsobuje možnosť vytvárania rôznych chemických štruktúr ako grafit, grafén, fularén, uhlíkové nanorúrky, diamant a amorfný uhlík. Uhlík má tiež schopnosť vytvárať rôznorodé anorganické aj organické zlúčeniny. Pre správne pochopenie fyzikálnych vlastností je potrebná analýza vytvorených diamantových vrstiev a pochopenie javov, ktoré sprevádzajú rast diamantovej štruktúry. Na tento účel sú vy-užívané rôzne analytické metódy, ktoré skúmajú tvar, morfológiu alebo chemické zloženie vytvorenej štruktúry. Medzi takéto metódy patria skenovací elektrónový mikroskop (SEM), Ramanova spektroskopia, Röntgenová difrakcia XRD (X-ray Diffraction) a hmotnostná spektrometria sekundárnych iónov SIMS (Secondary ion mass spectrometry).

2. Vlastnosti diamantovej štruktúry

Diamant je najtvrdší známy materiál, ktorý kryštalizuje v kubickej kryštalickej mriežke. Táto mriežka je vytvorená z dvoch kubicky plošne centrovaných mriežok posunutých o $1/4$ v smere diagonály. V diamantovej štruktúre je každý atóm uhlíka obklopený ďalšími štyrmi atómami v tetrahedrickom usporiadaní. Atómy sú viazané silnými σ väzbami. Vzdialenosť medzi jednotlivými atómami je $1,54 \text{ \AA}$ a ich väzbová energia je $7,41 \text{ eV}$ [1].

Tab. 1. Vybrané vlastnosti diamantu

Vlastnosť	hodnota	jednotka
tvrdosť	10000	kg/mm ²
silu, pružnosť	>1,2	GPa
silu, stláčanie	>1,2	GPa
rýchlosť šírenia zvuku	18000	ms ⁻¹
hustota	3,52	g/cm ³
modul pružnosti	1220	GPa
koeficient tepelnej rozťažnosti	0,8	10 ⁻⁶ /°C
tepelná vodivosť	20	W/cm.K

Silná diamantová štruktúra spôsobuje špeciálne me-chanické a elasticke vlastnosti (Tab. 1). Vlastnosti ako tvrdosť, molová hustota, tepelná vodivosť, rýchlosť šírenia zvuku a modul pružnosti majú najvyššie hodnoty zo všetkých známych materiálov, zatiaľ čo stlačiteľnosť diamantu je najmenšia. Koeficient trenia je len 0,05 a index lomu svetla má hodnotu 2,4 [1].

Elektrický odpor dosahuje hodnotu $10^{15} \Omega\text{cm}$ a preto diamant patrí medzi elektrické izolanty. V prípade, že do kryštalografickej mriežky je zabudovaný dopant, stáva sa z neho vynikajúci polovodič, ktorý má nulovú výstupnú prácu elektrónov. Pre získanie polovodiča typu P sa ako dopant najčastejšie používa bór. Vyrobenie polovodiča typu N je problematickejšie, pretože diamant má veľmi kompaktnú kryštalickú štruktúru a práve jeho silné a krátke väzby medzi uhlíkovými atómami spôsobujú problémy pri dopovaní atómami väčšími ako je atóm uhlíka.

Diamant má tiež výborné chemické vlastnosti, pretože nereaguje na žiadne bežné kyseliny. Avšak, diamant pri vysokých teplotách ľahko oxiduje (zmení sa na grafit). Pri teplote nad 1144 °C reaguje z vodnou parou a oxidom uhličitým. Už v roku 1796 bolo dokázané, že diamantová štruktúra je zložená z uhlíka a odvtedy prebehlo mnoho pokusov za účelom výroby technického diamantu.

V prvotných pokusoch ako základná forma na vytvorenie diamantu bola použitá iná forma uhlíka a to grafit. Proces premeny sa ukázal ako extrémne zložitý, hlavne kvôli tomu, že grafit je termodynamicky stabilná forma uhlíka pri izbovej teplote a atmosférickom tlaku. Aj keď štandardná entalpia medzi grafitom a diamantom sa líši len o 2,9 KJ.mol⁻¹, veľká aktivačná bariéra zabraňuje ich vzájomnej premene pri izbovej teplote a atmosférickom tlaku. Avšak tiež platí, že diamant nemôže samovoľne konvertovať na grafit pri týchto podmienkach. Diamant je síce kineticky stabilný, ale za určitých podmienok je termodynamicky nestabilný pri vyšších teplotách [2].

Diamant môže byť vyrábaný pri podobných podmienkach, ako bol vytváraný prírodný diamant hlboko pod zemským povrchom, t.j. zahrievaným uhlíka pod vysokým tlakom. Tento proces tvorí základy HPHT (High Pressure, High Temperature) techniky. V tomto procese je grafit stláčaný v hydraulickom lise tlakom v desiatkach tisíc atmosfér a zohriaty na teplotu vyššiu ako 2200°C za prítomnosti vhodného kovového katalyzátora.

Hlavným nedostatkom HPHT metódy je produkcia diamantu vo forme monokryštálov v

rôznych veľkostiach od nanometrov až po milimetre a to limituje aplikácie, kde môže byť takto vyrobený diamant použitý. Preto je požadovaná metóda na produkovanie diamantu vo forme, ktorá umožní využiť maximum z jeho mimoriadnych vlastností. Chemická depozícia z organických pár je metóda, pomocou ktorej je možné vyrobiť diamant bez potrebného vysokého tlaku a teploty, čo pochopiteľne prináša výhody ako jednoduchšia konštrukcia aparatury a menšie výrobné náklady [2].

3. Chemická depozícia s pár (CVD)

Chemická depozícia z pár CVD (Chemical Vapour Deposition) zahŕňa chemickú reakciu plynu nad pevným substrátom, ktorá spôsobuje adsorbciu molekúl plynu na povrch substrátu. Táto metóda vyžaduje prostriedky pre aktiváciu plynov obsahujúcich uhlík, t.j. prekursorov pre diamantový rast. Túto aktiváciu môže spôsobiť teplo (horúce vlákno), elektrický výboj (DC, RF a mikrovlnná plazma) alebo zapálený plameň (napr. acetýlenový horák) a iné. Aj keď sa tieto metódy v detailoch odlišujú, majú mnoho spoločného. Pre úspešný rast diamantovej vrstvy sa vyžadujú presne definované podmienky ako napríklad pomer uhlíkovodíkových plynov (napr. CH_4) k vodíku v pomere približne 1-5 % a teplota substrátu sa pohybuje v rozmedzí od 500 do 1000 °C.

Pri metóde HF CVD sa používa vákuová komora, ktorá je neustále čerpaná výevou. Prívod pracovných plynov do reaktora je starostlivo kontrolovaný. Škrtiaca klapka udržiava tlak v komore v rozsahu 1-5 KPa a žeravené vlákna zohrievajú substrát na teplotu 700 až 900 °C. Substrát sa nachádza na držiaku umiestnenom niekoľko mm pod žeravými vláknami, ktoré sú vyhrievané až na teplotu 2200 °C. Táto teplota je potrebná na úplné rozloženie pracovných plynov. Vlákná musia byť vyrobené z kovu, ktorý má vysokú teplotu tavenia a zároveň nebude významne reagovať s procesným plynom počas rastu.

HF CVD je relatívne lacná a pomerne jednoduchá metóda slúžiaca k produkcii primerane kvalitného polykryštalického diamantu pri rýchlosti rastu 1 až 10 $\mu\text{m h}^{-1}$, v závislosti od depozičných podmienok. Medzi hlavné nevýhody patrí vysoká citlivosť horúcich vlákien na oxidačné a korozívne plyny čo výrazne limituje typy použitých plynov. Veľkým nedostatkom je kontaminácia diamantovej vrstvy materiálom zo žeravého vlákna. Hoci táto kontaminácia v desiatkach ppm nie je výrazný problém pre použitie v mechanických aplikáciách, pre elektronické aplikácie je táto kontaminácia neprijateľná. Pri procese výroby sú dôležité niektoré procesy ako napr. čistenie vzoriek alebo nukleácia [2].

3.1. Nukleácia

Na vytvorenie diamantovej vrstvy je potrebné najskôr vytvoriť na povrchu substrátu miesta, ktoré budú slúžiť ako záchytné miesta pre zachytávanie atómov uhlíka a následné vytváranie diamantovej vrstvy. Pri použití prírodného diamantu ako substrátu (tzv. homoepitaxný rast) takéto miesta už existujú a rast pokračuje postupným prerastením pôvodnej štruktúry. Avšak pre nediamantové substráty (tzv. heteroepitaxný rast) takéto štruktúra nie je prítomná a atómy uhlíka sú okamžite po adhézii odleptané späť do plynnej fázy reakciou s atomárnym vodíkom.

Následkom toho by čas potrebný do začiatku samotného rastu bol extrémne dlhý

(hodiny alebo dokonca dni), čo by znemožnilo samotný rast. Preto je potrebné povrch substrátu pred depozíciou upraviť a tým zredukovať čas potrebný na vytvorenie zárodokov a zvýšenie hustoty nukleačných miest. Táto úprava (tzv. nukleácia) je tiež potrebná pre lepšiu adhéziu diamantovej vrstvy k povrchu substrátu [2].

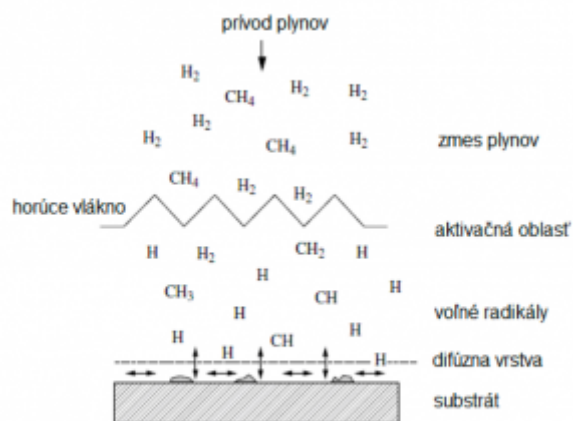
Nukleácia je prvý kritický bod rastu. Je dôležitá pre vlastnosti ako priemer zrn vytvorenej diamantovej vrstvy, orientácia vytvorenej kryštalickej mriežky, priehľadnosť vrstvy, adhézia vytvorenej vrstvy k povrchu substrátu a hrúbku vytvorenej vrstvy. Skúmanie procesu nukleácie vedie nielen ku väčšej kontrole rastu, ale poskytuje aj náhľad do samotného mechanizmu rastu [1]. Existujú dva základné druhy nukleácie:

- **Nukleácia diamantovým práškom** je najjednoduchšia nukleačná metóda. Princíp spočíva v tom, že poškrabanie (scratching) povrchu vzorky diamantovým práškom vytvára zárodky pre následný diamantový rast.
- **Nukleácia elektrickým predpätím** je bombardovanie povrchu vzorky kladnými iónmi, ktoré pomáhajú vytvárať nukleačné miesta na povrchu vzorky [1].

3.2. Aktivácia plynov

Pre úspešný rast diamantových vrstiev je potrebná prítomnosť pracovných plynov v reaktore, kde prebieha rast. Ako pracovné plyny sa najčastejšie používajú vodík a metán. Molekula metánu CH_4 obsahuje uhlík a je potrebná ako prekursor pre diamantový rast. Najdôležitejší význam vodíka spočíva v tom, že leptá vytvorené nediamantové uhlíkové útvary vytvorené na povrchu vzorky (najčastejšie grafit), čím skvalitňuje vytvorenú diamantovú vrstvu.

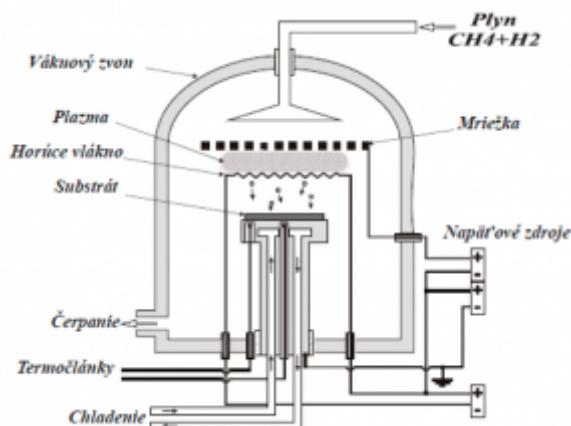
Avšak najskôr je potrebné tieto molekuly plynu aktivovať, t.j. rozložiť na atómy vodíka H a voľné radikály ako napr. $\text{CH}_3\cdot$. Na obr. 1 je vysvetlený princíp aktivácie plynov metódou HF CVD za pomoci volfrámových vlákien rozžeravených na vysokú teplotu



Obr. 1. Princíp aktivácie plynov pri metóde HF CVD [2].

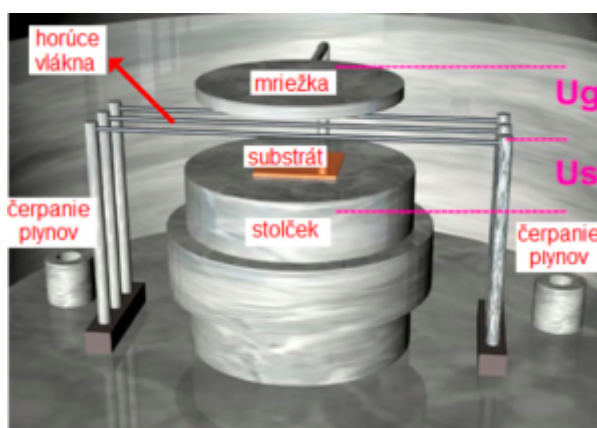
4. HF CVD reaktor

Vzorky boli pripravené na Ústave elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave pomocou metódy HF CVD, kde je umiestnený reaktor na prípravu diamantových vrstiev pomocou tejto metódy (obr.2).



Obr. 2. Reaktor na prípravu diamantových štruktúr metódou HF CVD [3].

Dôležitou časťou aparatury je vákuový zvon, ktorý s pomocou rotačnej olejovej vývevy vytvára požadovaný tlak a zabezpečuje čerpanie prebytočných plynov. Vo vnútri tohto zvona sa nachádza stolček, na ktorom je položený substrát, na ktorom sa vytvára diamantová vrstva. Približne 1 cm nad týmto stolčekom sa nachádzajú žeravé vlákna, ktoré sú potrebné k aktivácii plynov a sú napájané prúdovými zdrojmi. Žeravé vlákna sú najčastejšie z volfrámu a sú napájané zdrojmi z napätiami U_{h1} , U_{h2} a s prúdmi I_{h1} , I_{h2} . Dĺžkou a hustotou umiestnenia vlákien môžeme ovplyvňovať max. veľkosť plochy rastu, ktorá je pri tomto reaktore približne 100 cm^2 .



Obr. 3. Detailný pohľad na vnútro reaktora zo zapojenými zdrojmi [4].

Pracovné plyny sú privádzané pomocou potrubia a mriežka na konci tohto potrubia zabezpečuje rovnomerné rozdelenie plynov nad stolčekom. Tento reaktor umožňuje nezávislé pripojenie napätia medzi substrátom a vláknami (U_s), ako aj medzi vláknami a mriežkou (U_g) (obr. 3). Toto napätie slúži hlavne na urýchlenie prekursorov potrebných pre diamantový rast na povrch substrátu. Súčasťou aparatury je aj chladenie stolčeka vodou a termočlánky, ktoré slúžia na meranie teploty stolčeka, na ktorom je umiestnený substrát.

5. Analýza vzoriek

V tejto práci boli vzorky vytvorené pri pomere plynov metánu k vodíku 3:300, teplote stolčeka $620 \text{ }^\circ\text{C}$ a pri zníženom tlaku 1500 Pa . (štandardne sa používa tlak 3000 Pa). Čas vytvárania vrstvy bol 30 minút. Ako substrát bol použitý kremík dopovaný fosforom s orientáciou (100). Kremíkový substrát bol zvolený pre jeho vysokú teplotu topenia, diamantovú kryštalickú štruktúru a pre s diamantom podobnú hodnotu

koeficientu teplotnej rozťažnosti.

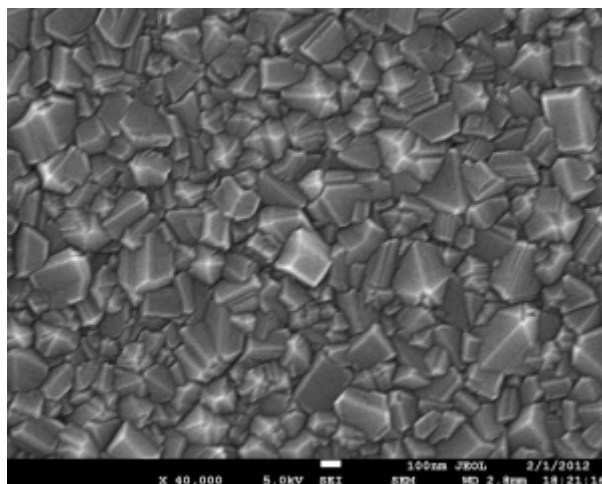
Pred samotným rastom bol vykonaný proces čistenia kremíkového substrátu v ultrazvukovom kúpeli v acetóne na prístroji KRAINTEK 5LE s výkonom 150°W, frekvenciou 38 kHz a teplotným rozsahom 20 až 90°C. Na rovnakom prístroji bola vykonaná aj nukleácia, kedy boli vzorky v ultrazvukovom kúpeli v roztoku demineralizovanej vody s diamantovým práškom. Na skúmanie vlastností vytvorených vzoriek sa používajú rôzne metódy, ktoré sa podľa oblastí skúmania rozdeľujú na:

- **Určenie morfológie vzorky.** Medzi takéto metódy patria hlavne mikroskopy, ako optický a elektrónový.
- **Určenie kryštalografickej štruktúry vzorky.** Na tento účel sa používajú difrakčné metódy (napr. XRD), pomocou ktorých sa zisťujú parametre ako kryštalografické roviny a mriežkové parametre.
- **Zloženie materiálu.** Tieto metódy (napr. SIMS) poskytujú obraz o chemickom zložení skúmaného materiálu. Prítomnosť chemických väzieb sa zisťuje Ramanovou spektroskopiou.

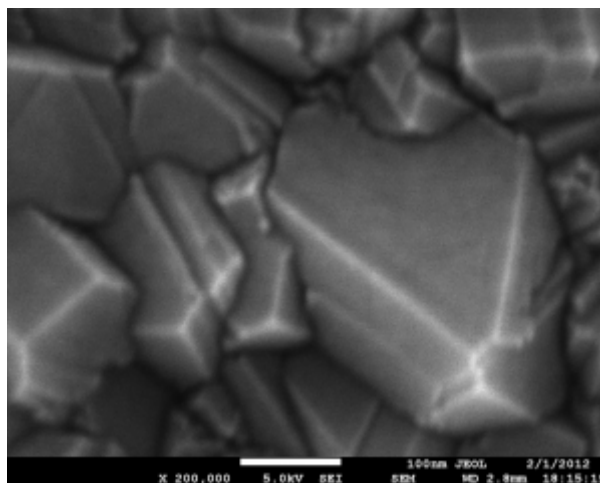
5.1. Rastrovací elektrónový mikroskop

Na zobrazenie útvarov a štruktúr veľmi malej veľkosti sa používa Rastrovací elektrónový mikroskop SEM (Scanning Electron Microscopy), pretože optický mikroskop dokáže pracovať iba v rozmeroch podobných vlnovej dĺžke viditeľného svetla, t.j. okolo 470 nm pre modré svetlo. Skenovací elektrónový mikroskop používa fokusovaný lúč elektrónov s vysokou energiou, ktorý spôsobí vznik signálov, ktoré pochádzajú z interakcie elektrónov so vzorkou a dávajú informáciu o vzorke. Tieto signály zahrňujú sekundárne elektróny, elektróny zo spätného rozptylu, fotóny, viditeľné svetlo a teplo.

Pri metóde SEM sa na vyhodnocovanie používajú sekundárne elektróny, ktoré pochádzajú z určitej oblasti povrchu vzorky. Pomocou metódy SEM je možné zobrazit objekty a oblasti na povrchu vzorky veľkosti menšej ako 50 nm [5]. Na SEM snímke získanej na Ústave elektroniky a fotoniky FEI STU (obr. 4) je možné vidieť rovnomerné pokrytie vzorky kryštalografickými útvarmi rôzneho tvaru a veľkosti. Pomedzi tieto kryštály sa nachádzajú menšie útvary, pravdepodobne amorfný uhlík. Povrch vzorky je pokrytý rovnomerne, bez výraznejších deformácií, čo potvrdzuje aj detailnejší záber na túto štruktúru (obr. 5).



Obr.4. SEM snímka vytvorenej vrstvy.

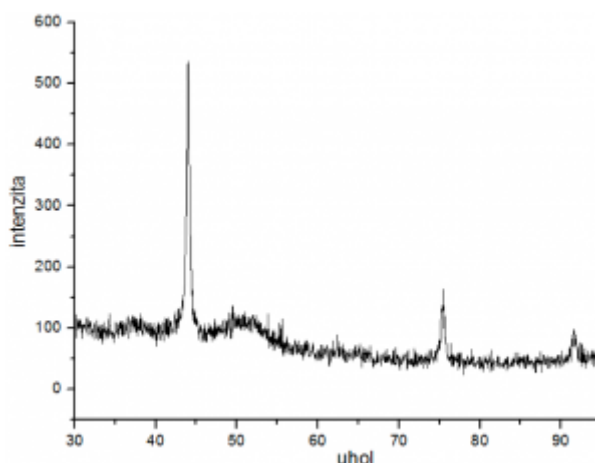


Obr.5. SEM snímka detailu vytvorenej štruktúry.

5.2. Röntgenová difrakcia

Röntgenová difrakcia XRD (X-Ray Diffraction) je metóda používaná na charakterizáciu vlastností kryštalografických materiálov, ako kryštalografická štruktúra, veľkosť zrn a preferovaná orientácia kryštálov. Princíp metódy spočíva v tom, že povrch vzorky ožarujeme röntgenovými lúčmi pod rôznym uhlom označovaným ako 2θ . Podľa intenzity odrazeného je možné určiť požadované parametre.

XRD spektrum (obr. 6) bolo vytvorené na Elektrotechnickom ústave Slovenskej akadémie vied a ukazuje najvýraznejší vrchol pri uhle 44° , čo je odraz od kryštalografickej roviny (111). Viditeľné sú aj vrcholy pri uhle 75° , čo priradujeme kryštalografickej rovine (220) a menej výrazný vrchol pri uhle 92° , čo je odraz od roviny (331) [6]. Intenzita odrazeného žiarenia pri iných uhloch je považovaná za odraz od ostatných uhlíkových útvarov na povrchu vzoriek. Tieto výsledky jednoznačne potvrdzujú dominantnú diamantovú kryštalografickú štruktúru vytvorenej vzorky.



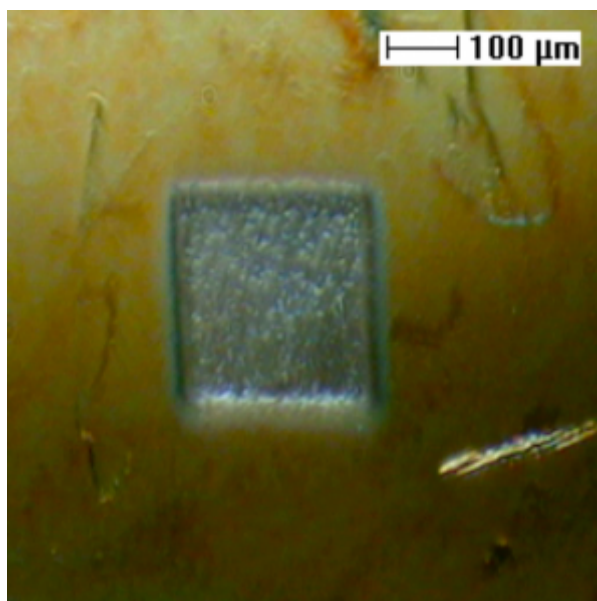
Obr. 6. Röntgenová difrakcia (XRD) vytvorenej diamantovej vrstvy.

5.3. Hmotnostná spektrometria sekundárnych iónov

Hmotnostná spektrometria sekundárnych iónov SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy) je analytická metóda na zisťovanie chemického zloženia materiálu. Základom SIMS analýzy je dopad iónov s vysokou energiou vo vysokom vákuu na

skúmaný povrch. Dopad primárnych iónov na vyšetrovaný povrch generuje neutrálne atómy a sekundárne ióny s energiou asi 20 eV. Tieto sprostredkujú informácie o chemickom zložení povrchovej vrstvy skúmaného materiálu [7].

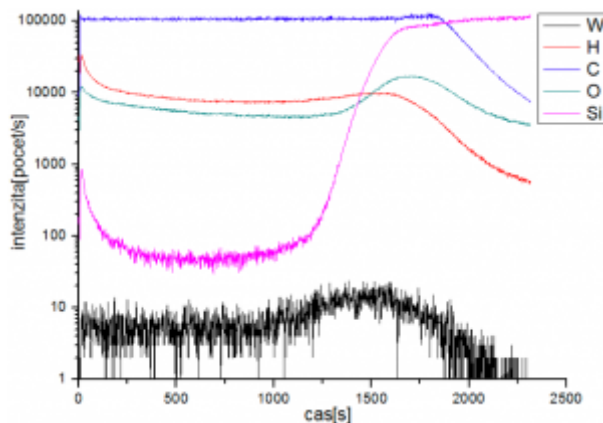
Dôsledkom dopadu primárnych iónov sú generované sekundárne ióny s vysokou kinetickou energiou (niekoľko tisíc eV), ktoré po dopade na povrch vzorky odovzdajú svoju kinetickú energiu atómom a molekulám na povrchu. Táto reakcia primárneho iónu spôsobí, že zasiahnuté atómy (molekuly, zhluky molekúl) sú explodované do prostredia z povrchu analyzovanej vzorky. Tieto explodované častice sú následne analyzované v hmotnostnom spektrometri. S využitím odprašovacieho iónového zdroja sa môže získať hĺbkový profil, ktorý informuje o trojdimenzionálnom rozdelení chemických prvkov vo vzorke [7]. Počas procesu merania sa postupne vytvára kráter (obr. 7).



Obr. 7. Optická snímka vytvoreného kráteru, ktorý vznikol pri meraní hĺbkového profilu. Na obrázku je možné vidieť mierne mechanické poškodenie vzorky.

Vo výslednom hĺbkovom profile (obr.8) sú znázornené koncentrácie niekoľkých vybraných prvkov v závislosti od času odprašovania, čiže v závislosti od hĺbky. Po dodatočnom určení hrúbky vrstvy je možné profil prekalibrovať na hrúbky vrstvy. Odprašovací rýchlosť diamantovej vrstvy a kremíka je rôzna, čoho dôsledkom je nelineárna stupnica hrúbok. Pre presné určenie hrúbok sa dajú použiť metódy SEM alebo konfokálny mikroskop, alebo interferenčná metóda určenie hrúbok (napr Veeco).

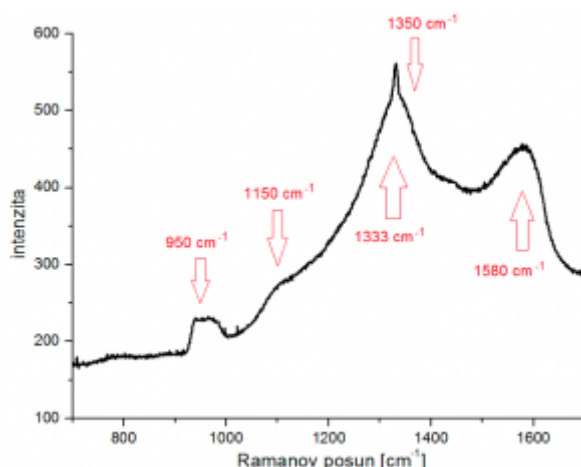
Vo výslednom grafickom zobrazení hĺbkové profilu je znázornená koncentrácia uhlíka C, čo potvrdzuje, že vytvorená vrstva je zložená práve z tohto prvku a je na povrchu vzorky jasne dominantná. Koncentrácia C na rozhraní diamantovej vrstvy s kremíkovým substrátom klesá. Vyjadruje aj teplotnú difúziu, pretože vzorky boli počas rastu vystavené vysokej teplote nad 600°C. Pomerne vysoká koncentrácia kyslíka O je dôsledkom technológie prípravy. Koncentrácia vodíka potvrdzuje jeho prítomnosť pri procese rastu. Prítomný volfrám pochádza z rozžeravených vlákien a spôsobuje znečistenie vytvorenej vrstvy.



Obr. 8. Hĺbkový profil diamantovej štruktúry v logaritmickej mierke získaný pomocou metódy SIMS.

5.4. Ramanova spektroskopia

Ramanova spektroskopia je druh vibračnej spektrometrie a využíva sa k zisteniu chemických väzieb v materiáloch. Dopadajúce svetlo (fotóny) excitujú molekulu do iného energetického stavu (alebo naopak), pričom sa zmení aj energia svetla. Tento jav sa nazýva aj nepružná zrážka a pre každý materiál je typická iná frekvencia rozptýleného svetla a porovnávaním spektier môžeme určiť vlastnosti vyšetřovaného materiálu, ako typ prítomných chemických väzieb.



Obr. 9. Ramanove spektrum vytvorenej diamantovej štruktúry.

Meranie pomocou Ramanovej spektroskopie (obr.9) bolo uskutočnené na ÚEF KME FEI STU s hélium-neónovým laserom s vlnovou dĺžkou $\lambda=632,8$ nm. V spektre je vidieť závislosť intenzity žiarenia od ramanovho posunu, pomocou ktorého môžeme určiť prítomné väzby v materiály. Ostrý vrchol pri 1333 cm^{-1} potvrdzuje prítomnosť diamantu, rovnako ako aj menej výrazné vrcholy pri 1150 cm^{-1} a 1350 cm^{-1} . Pomerne rozložitý vrchol pri 1580 cm^{-1} znamená, že sú prítomné aj grafítové väzby. Menej výrazný vrchol pri 925 cm^{-1} je kremíkový vrchol druhej harmonickej zložky, čo je spôsobené kremíkovým substrátom.

6. Záver

Aj keď sa už v súčasnosti diamant používa v niektorých oblastiach priemyslu, ako napr. v strojárstve, kde sa vytvára diamantová vrstva na povrchu rezných a vrtacích nástrojov, čím sa skvalitňuje kvalita rezu a výrazne predlžuje životnosť nástrojov,

rozvoj v ďalších oblastiach je limitovaný kvalitou vytvorených diamantových štruktúr. Pre jeho väčšie využitie je potrebné správne pochopenie procesov pri depozícii diamantových vrstiev, k čomu nám slúžia hlavne analytické techniky ako SEM, SIMS, XRD a Ramanova spektroskopia.

Aj keď je v súčasnosti proces depozície diamantu na kremíkom substráte možný, v budúcnosti je cieľom vyrábať diamantové vrstvy aj na iných substrátoch, s väčšou hrúbkou, nižším znečisteným a tým aj vyššou kvalitou. Cieľom je tiež vytvárať samonosné diamantové vrstvy. Po vyriešení všetkých týchto problémov nájde diamant uplatnenie v elektronických, senzorových, optických, strojárskych a biologických aplikáciách priemyslu a vedy v blízkej budúcnosti.

Podakovanie

Táto práca vznikla rámci riešenia výskumných projektov Perspektívne prvky a štruktúry pre integrovanú fotoniku VEGA 1/0787/09 a Diamantové elektródy pre elektromechanické aplikácie APVV-0548/07.

7. Referencie

1. S.-Tong Lee , Zhangda Lin, Xin Jiang: CVD diamond films: nucleation and growth in Materials Science and Engineering, 25 (1999) 123-154
2. By Paul W. May: Diamond thin films: a 21st-century material. In Phil. Trans. R. Soc. Lond. A (2000) 358, 473-495
3. Kolmačka, Michal - Kadlečíková, Magdaléna Opto-lektronický merač teploty pre HF CVD reaktor. In: ŠVOČ 2008 : Zborník víťazných prác. Bratislava, Slovak Republic, 23.4.2008. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2008. - ISBN 978-80-227-2865-2. - CD-Rom
4. KROMKA, A. et. al. Influence of Substrate Bias Pretreatment on Growth of Diamond Films By HFCVD. In Surface Engineering, vol. 19, 2003, pp. 417 - 420. Rybar, Andrej, VIRTUAL TOUR: Analýza materiálov a vákuová technika [online].
5. http://kme.elf.stuba.sk/virtualtour/amvt/sk/?page_id=24
6. Susan Swapp, (University of Wyoming) : Scanning electron microscopy (SEM). 2.4.2011. http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html
7. X. Liu et al.: Spectroscopic studies of nanocrystalline diamond materials In: Diamond & Related Materials 16 (2007) 1463-1470
8. Michniak, Pavol - Vincze, Andrej: Princíp činnosti hmotnostnej spektrometrie sekundárnych iónov. In: ŠVOČ 2008 : Zborník víťazných prác. Bratislava, Slovak Republic, 23.4.2008. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2008. - ISBN 978-80-227-2-65-2. - CD-Rom

Spoluautorom článku je Ing. Marián Varga, Ing. Andrej Vincze, PhD., Ústav elektroniky a fotoniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava a Medzinárodné laserové centrum, Ilkovičova 3, 841 04 Bratislava

Práca bola prezentovaná na Študentskej vedeckej a odbornej činnosti (ŠVOČ 2011) v sekcii e-Learning a web technológie v elektronike a získala Cenu sponzora, ISBN 978-80-2-

7-3508-7
