

H01J 37/28 (2006.01)

H01J 37/30 (2006.01)

H01J 37/305 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2019-241**
 (22) Přihlášeno: **15.04.2019**
 (30) Právo přednosti:
16.04.2018 DE 10 2018 108 974.0
 (40) Zveřejněno: **23.10.2019**
(Věstník č. 43/2019)
 (47) Uděleno: **22.11.2023**
 (24) Oznámení o udělení ve věstníku: **03.01.2024**
(Věstník č. 1/2024)

(56) Relevantní dokumenty:

Martial Duchamp, Qiang Xu, Rafal E Dunin-Borkowski. Convenient Preparation of High-Quality Specimens for Annealing Experiments in the Transmission Electron Microscope. *Microscopy and Microanalysis*, 05 November 2014, 2014, Vol. 20, No. 6, p. 1638-1654, ISSN <https://doi.org/10.1017/S1431927614013476>.

EP 1998356 B1; US 2014190934 A1; US 2015001176 A1; US 2017256380 A1.

(73) Majitel patentu:

Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, DE

(72) Původce:

Josef Biberger, Wildenberg, DE

Stefan Lengweiler, Oberkochen, DE

(74) Zástupce:

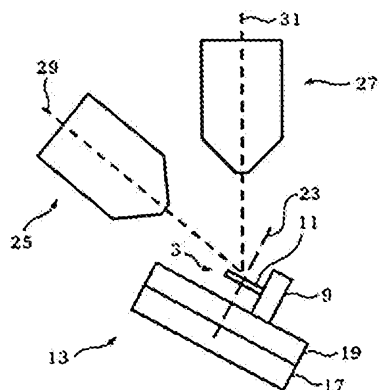
Kania, Sedlak, Smola, s.r.o., Mendlovo náměstí
907/1a, 603 00 Brno, Staré Brno

(54) Název vynálezu:

Postup výroby vzorku pro TEM

(57) Anotace:

Během postupu výroby vzorku pro TEM se objekt (3) upevní na prvku (19) držáku (13) objektu tak, aby ke zpracování určená plocha (11) objektu (3) byla v podstatě umístěna kolmo k ose otáčení (23) prvku (19). Iontový paprsek je směřován pod malým úhlem dopadu na plochu (11) určenou ke zpracování, přičemž prvek (19) zaujímá ve vztahu k ose otáčení (23) různé polohy otáčení, zatímco iontový paprsek je směřován na plochu (11) určenou ke zpracování.



Postup výroby vzorku pro TEM

Oblast techniky

5

Předkládaný vynález se týká postupu výroby vzorku pro TEM s použitím systému paprsků částic.

Dosavadní stav techniky

10

Transmisní elektronová mikroskopie (TEM) je způsob znázornění a analýzy miniaturizovaných objektů o velikosti v řádové hodnotě několika málo nanometrů. TEM je využívána například k analýze integrovaných spínacích prvků. Objekt určený ke zkoumání musí být k tomuto účelu dostatečně tenký, aby elektrony elektronového paprsku mohly proniknout objektem, to znamená
15 transmittovat objektem. Vstupní plocha, na níž se elektronový paprsek setká s objektem, a výstupní plocha, na níž elektronový paprsek z objektu vystupuje, mají být navíc co nejhladší, to znamená, že mají vykazovat co nejmenší drsnost. V některých případech má být vstupní plocha co nejvíce paralelní s výstupní plochou. Existují však také aplikace, v nichž má mít objekt určený ke zkoumání a tím vstupní a výstupní plocha jinou podobu. Objekt splňující tyto předpoklady je
20 vhodný pro analýzu pomocí TEM a je následně označen jako vzorek pro TEM.

K výrobě vzorků pro TEM jsou obvykle používány systémy paprsků částic s jedním sloupkem iontových paprsků a jedním sloupkem elektronových paprsků. Sloupek iontových paprsků slouží ke zpracování objektu, zatímco sloupek elektronových paprsků k vytvoření obrázků objektu a tím
25 ke kontrole objektu. K nastavení polohy a k orientaci objektu ve vztahu ke sloupku iontových paprsků a sloupku elektronových paprsků se používá polohovací zařízení. Polohovací zařízení obsahuje například zkušební stůl, který poskytuje tři translační stupně volnosti a dva rotační stupně volnosti k nastavení polohy a k orientaci objektu vůči sloupku iontových paprsků a sloupku elektronových paprsků. Polohovací zařízení obsahuje často další pomocné konstrukce, které jsou umístěny na zkušebním stolku a které poskytují další stupně volnosti k pohybu objektu.
30 Tyto pomocné konstrukce musejí být z mechanického hlediska zhotoveny jako vysoce přesné a představují další náklady na ovládání a další potenciální zdroje chyb při nastavení polohy a při orientaci objektu.

35 Je tedy žádoucí, aby bylo možno vyrábět vzorky pro TEM bez nutnosti použití takových pomocných konstrukcí.

Patent US 2014/0190934 A1 popisuje postup a zařízení za účelem přípravy vzorků ke sledování v systému s nabitými paprsky částic takovým způsobem, aby se artefakty snížily nebo se jim zamezilo. Materiál se na vzorku s odloučením paprsků nabitých částic odloučí bezprostředně před mletím nebo v průběhu závěrečného mletí, což vede k povrchu bez artefaktů. Provedení jsou vhodná k výrobě tenkých vzorků pro TEM.
40

Patent US 2017/0256380 A1 popisuje techniky, které usnadňují automatizovanou extrakci lamel a nanášení lamel na mřížky k pozorování transmisními elektronovými mikroskopy.
45

Patent US 2015/0001176 A1 popisuje postup a zařízení ke změně orientace vzorku, který je zpracováván a analyzován pomocí systému paprsků částic.

50 Patent EP 1998356 B1 popisuje způsob přípravy *in situ* STEM vzorku pro FIB-STEM systém včetně vytvoření a oddělení TEM lamely a jejího opracování.

C. Li a kol., "An improved FIB sample preparation technique for site-specific plan-view specimens: A new cutting geometry", *Ultramicroscopy* 184 (2018), strany 310 až 317, popisuje
55 přípravu vzorku metodou FIB lift-out.

L. A. Giannuzzi a kol., "A review of focused ion beam milling techniques for TEM specimen preparation", Micron 30 (1999), strany 197 až 204, popisuje postup výroby vzorků pro transmisní elektronové mikroskopy při použití zaostřeného iontového paprsku.

5

Účelem předkládaného vynálezu je postup výroby vzorku pro TEM, při jehož realizaci by se vycházelo z konstruktivně jednoduchých prostředků.

10 Podstata vynálezu

K postupu výroby vzorku pro TEM je následně také předložen celkový přehled. V návaznosti jsou detailně popsány jednotlivé kroky tohoto postupu. Východí situací pro postup výroby vzorku pro TEM podle vynálezu je těleso s prostorovým rozsahem, který tvoří vzorek pro TEM určený k
15 výrobě.

V prvním kroku se část tělesa alespoň částečně oddělí od tělesa tím, že iontový paprsek generovaný ze sloupku iontových paprsků je směřován na těleso. Tato část tělesa je následně označena jako objekt. Objekt je fyzicky ještě spojen s tělesem na těch místech, na nichž iontový
20 paprsek nebyl směřován na těleso.

Ve druhém kroku je na objektu umístěn manipulátor. Manipulátor je veden například na povrch objektu a za použití iontového paprsku je manipulátor spojen s objektem.

25 Ve třetím kroku je objekt zcela oddělen od tělesa, například tak, že úsek spojující objekt s tělesem je odstraněn iontovým paprskem. K tomuto okamžiku postupu je objekt nesen manipulátorem a už není fyzicky spojen s tělesem.

Alternativně k výše popsaným krokům postupu lze objekt z tělesa uvolnit a spojit s manipulátorem jiným způsobem. Například lze manipulátor nejprve umístit na povrchu tělesa a
30 poté část tělesa fyzicky spojenou s manipulátorem oddělit od tělesa pomocí iontového paprsku.

Ve čtvrtém kroku je objekt přepraven za účelem dalšího zpracování k držáku objektu. Například je manipulátorem, na němž je objekt umístěn, pohybováno tak, aby se objekt dostal do kontaktu s držákem objektu. Poté je za použití iontového paprsku objekt upevněn na držáku objektu. Držák
35 objektu tak nese objekt.

V navazujícím pátém kroku je manipulátor od objektu uvolněn. Například je manipulátor uvolněn od objektu při použití iontového paprsku. V tomto okamžiku postupu je samotný objekt nesen držákem objektu. Držákem objektu je například zkušební stolek systému paprsků částic
40 nebo na zkušební stolku upevněná TEM mřížka.

V šestém kroku je objekt při použití iontového paprsku ztenčen. Například se za účelem dosažení požadované podoby objektu odebere při použití iontového paprsku z objektu materiál. Objekt lze iontovým paprskem zpracovat například tak, že objekt zahrnuje dva v podstatě vzájemně rovnoběžné povrchy a vzdálenost mezi těmito povrchy je dostatečně malá pro analýzu TEM. Vzdálenost mezi v podstatě vzájemně rovnoběžnými rovinami činí například nejméně 10 nm a nejvýše 1000 nm. Alternativně lze objekt iontovým paprskem zpracovat tak, že má podobu klínu apod. V šestém kroku se objekt ztenčí tak, že vykazuje tloušťku, která je dostatečně malá k tomu,
50 aby mohl být objekt analyzován pomocí TEM.

Po ztenčení objektu může povrch objektu vykazovat drsnost, která je vytvořena ztenčením pomocí iontového paprsku. Pro další vyhlazení povrchu objektu je v sedmém kroku povrch objektu leštěn při použití iontového paprsku, to znamená, že je z objektu odstraněn materiál.
55 Alternativně lze ztenčení a leštění objektu provést současně, případně ovlivnit stejnými kroky

postupu.

Níže jsou detailně popsány kroky postupu za účelem leštění objektu.

- 5 Leštění objektu se provádí při použití systému paprsků částic, který obsahuje sloupek iontových paprsků ke generování iontového paprsku a držák objektu k držení, nastavení polohy a k orientaci objektivu relativně ke sloupku iontových paprsků. Držák objektu vykazuje základní prvek, první prvek, druhý prvek, první ovladač a druhý ovladač. Základní prvek, první prvek a druhý prvek tvoří kinematický řetězec, v němž je působením ovladačů umožněn jejich vzájemný pohyb
10 a/nebo jejich vzájemná orientace.

Například je základní prvek umístěn uvnitř vakuové komory systému paprsků částic, přičemž může být poloha a orientace samotného základního prvku uvnitř vakuové komory nastavena působením nejméně jednoho dalšího ovladače. První prvek se může působením prvního ovladače
15 otáčet relativně k základnímu prvku okolo první osy otáčení. Druhý prvek se může být působením druhého ovladače otáčet relativně k prvnímu prvku okolo druhé osy otáčení. Držák objektu je konfigurován tak, aby byla první osa otáčení orientována v podstatě kolmo k druhé ose otáčení.

- 20 Otáčí-li první ovladač první prvek okolo první osy otáčení, otáčí se podle této konfigurace druhý prvek rovněž okolo první osy otáčení. Na druhou stranu se prvním prvek neotáčí okolo druhé osy otáčení v případě, že druhý ovladač otáčí druhý prvek okolo druhé osy otáčení.

Ke ztenčení a/nebo leštění objektu se objekt upevní na druhém prvku držáku objektu.

25 Objekt se přitom na druhém prvku upevní tak, aby plocha objektu určená ke zpracování byla umístěna v podstatě kolmo ke druhé ose otáčení. Objekt se například upevní na druhém prvku držáku objektu tak, že úhel mezi plochou objektu určenou ke zpracování a druhou osou otáčení činí nejméně 80°, výhodně nejméně 85°, dále výhodně nejméně 89°.

30 První ovladač je ovládán tak, aby hlavní osa sloupku iontových paprsků byla orientována k ploše určené ke zpracování pod plochým úhlem dopadu, zatímco druhý ovladač je ovládán tak, aby druhý prvek vykazoval ve vztahu k prvnímu prvku první polohu otočení okolo druhé osy otáčení. „Plochý úhel dopadu“ například znamená, že hlavní osa sloupku iontových paprsků uzavírá s
35 plochou určenou ke zpracování úhel, který činí nejméně 10°.

Při této konfiguraci ovladačů, to znamená, zatímco hlavní osa sloupku iontových paprsků je k ploše určené ke zpracování orientována pod plochým úhlem dopadu a druhý prvek ve vztahu k
40 prvnímu prvku zahrnuje první polohu otočení okolo druhé osy otáčení, je iontový paprsek generovaný sloupkem iontových paprsků směřován na objekt za účelem odstranění materiálu z objektu.

Následně je první ovladač ovládán tak, aby hlavní osa sloupku iontových paprsků byla (nadále) orientována k ploše určené ke zpracování pod malým úhlem dopadu, zatímco druhý ovladač je
45 ovládán tak, aby druhý prvek ve vztahu k prvnímu prvku vykazoval druhou polohu otočení okolo druhé osy otáčení, přičemž druhá poloha otočení je od první polohy otočení odlišná. V nejjednodušším případě dojde působením druhého ovladače k otočení druhého prvku relativně k prvnímu prvku okolo druhé osy otáčení, čímž je poloha otočení druhého prvku ve vztahu k prvnímu prvku převedena z první polohy otočení do druhé polohy otočení, zatímco nastavení
50 prvního ovladače zůstane nezměněno.

V této konfiguraci ovladačů, to znamená, zatímco je hlavní osa sloupku iontových paprsků orientována k ploše určené ke zpracování pod plochým úhlem dopadu a druhý prvek ve vztahu k
55 prvnímu prvku zaujímá druhou polohu otočení okolo druhé osy otáčení, je iontový paprsek generovaný sloupkem iontových paprsků směřován na objekt za účelem odstranění (obnoveného)

materiálu.

Tímto způsobem je iontový paprsek směřován na objekt z různých směrů, ale vždy pod plochým úhlem dopadu k ploše určené ke zpracování. Nepravidelnosti povrchu objektu, to znamená
 5 drsnost objektu, která vznikla předchozím zpracováním objektu, lze tímto způsobem snížit. Speciálním uspořádáním objektu (přesněji řečeno plochy objektu určené ke zpracování) relativně ke druhému prvku držáku objektu, konfigurace samotného držáku objektu a orientace hlavní osy sloupku iontových paprsků (přesněji řečeno iontového paprsku) relativně k ploše určené ke
 10 zpracování lze snížit drsnost plochy určené ke zpracování, a to tak, že se okolo druhé osy otáčení otočí pouze druhý prvek a iontový paprsek u dvou odlišných poloh otáčení druhého prvku ve vztahu k prvnímu prvku je směřován na objekt okolo druhé osy otáčení. Touto speciální konfigurací lze snížit drsnost povrchu určeného ke zpracování, aniž by byla ke zkušebnímu stolku nutná přídavná pomocná zařízení. To zjednodušuje konfiguraci a snižuje náklady na ovládání systému použitého k realizaci postupu.

15 Na základě provedení uvedeného jako příklad se první poloha otáčení od druhé polohy otáčení liší o nejméně 5° , výhodně o nejméně 10° . To znamená, že při převedení druhého prvku držáku objektu z první polohy otáčení do druhé polohy otáčení provede druhý prvek ve vztahu k prvnímu prvku otáčku okolo druhé osy otáčení nejméně 5° , výhodně nejméně 10° a/nebo nejvýše
 20 45° , výhodně nejvýše 35° .

Na základě provedení uvedeného jako příklad tvoří druhý prvek poslední kinematický prvek, pokud jde o (rotační) stupně volnosti umožněné držákem objektu. To znamená, že je objekt upevněn na tom prvku držáku objektu, který ve vztahu k základnímu prvku vykazuje nejvíce
 25 (rotačních) stupňů volnosti pohybu. Jinými slovy je objekt na držáku objektu upevněn tak a držák objektu je vytvořen tak, aby mezi objektem a druhým prvkem držáku objektu neexistoval žádný ovladatelný stupeň volnosti pohybu.

Držák objektu může být konfigurován tak, aby byla realizována otáčivost prvního prvku vzhledem k základnímu prvku okolo první osy otáčení bez stupňů volnosti mezi nimi. To znamená, že v kinematickém řetězci mezi základnou a prvním prvkem nehledě k otáčivosti okolo
 30 první osy otáčení neexistují žádné další ovladatelné stupně volnosti, zejména žádné další rotační stupně volnosti. Například základna a první prvek jsou vždy spojeny přímo s prvním úložným zařízením, které umožní stupeň volnosti otáčivosti okolo první osy otáčení, avšak také i
 35 znemožní další (rotační) stupně volnosti.

Držák objektu může být konfigurován tak, aby byla umožněna otáčivost druhého prvku relativně k prvnímu prvku okolo druhé osy otáčení bez stupňů volnosti mezi nimi. To znamená, že v kinematickém řetězci mezi prvním prvkem a druhým prvkem nehledě k otáčivosti okolo druhé
 40 osy otáčení neexistují žádné další ovladatelné stupně volnosti, zejména žádné další rotační stupně volnosti. Například první prvek a druhý prvek jsou vždy spojeny přímo s druhým úložným zařízením, které umožní stupeň volnosti otáčivosti okolo druhé osy otáčení, avšak také zamezí dalším (rotačním) stupňům volnosti. Vzhledem ke konfiguraci držáku objektu je upevnění objektu na druhém prvku (alespoň ve vztahu k otáčkám) nehybné.

45 Na základě provedení uvedeného jako příklad je iontový paprsek během otáčení druhého prvku z první polohy otáčení do druhé polohy otáčení alespoň dočasně směřován na objekt. Zejména je iontový paprsek během doby otáčení druhého prvku z první polohy otáčení do druhé polohy otáčení směřován na objekt. Tím je iontový paprsek směřován na objekt z více směrů, avšak
 50 vždy pod plochým úhlem dopadu k ploše určené ke zpracování, čímž se povrch objektu lépe vyhladí.

Alternativně nemusí být iontový paprsek během otáčení druhého prvku z první polohy do druhé polohy otáčení směřován na objekt.

55

Na základě výhodného provedení je objekt před ztenčením/leštěním uspořádán tak, aby druhá osa otáčení pronikala plochou určenou ke zpracování. Tímto způsobem lze zjednodušit ovládání ovladačů, protože při otáčení druhého prvku okolo druhé osy otáčení provede plocha určená ke zpracování relativně k prvnímu prvku v podstatě pouze otáčku a nikoli translaci. Aby zůstal iontový paprsek při otáčení druhého prvku okolo druhé osy otáčení směřován na plochu určenou ke zpracování, nemusí být u tohoto provedení kompenzována translace plochy určené ke zpracování relativně k prvnímu prvku (a tím také relativně ke sloupci iontových paprsků).

Na základě alternativního provedení je objekt před ztenčením/leštěním uspořádán tak, aby druhá osa otáčení nepronikala plochou objektu určenou ke zpracování

Na základě výhodného provedení obsahuje systém paprsků částice k realizaci postupu dále sloupek elektronových paprsků. Hlavní osa sloupku elektronových paprsků a hlavní osa sloupku iontových paprsků mohou pronikat společným pracovním rozsahem, v němž může být umístěn objekt při použití držáku objektu. Hlavní osa sloupku elektronových paprsků a hlavní osa sloupku iontových paprsků mohou v podstatě ležet ve společné rovině. V tomto provedení může být základní prvek držáku objektu vyrovnán tak, například působením jednoho nebo více ovladačů, že první osa otáčení bude orientována v podstatě kolmo ke společné rovině. To umožňuje, aby byl samotný objekt určený ke zpracování nastavením prvního ovladače, to znamená otáčením prvního prvku držáku objektu relativně k základnímu prvku držáku objektu vyrovnán na hlavní osu sloupku elektronových paprsků a/nebo na hlavní ose sloupku iontových paprsků. Dále může být v této konfiguraci, ve které je první osa otáčení orientována kolmo k hlavní ose sloupku iontových paprsků, jednoduše nastaven úhel mezi povrchem objektu určeným ke zpracování a hlavní osou sloupku iontových paprsků, a tím úhel dopadu iontového paprsku na povrch objektu určený ke zpracování, čímž se nastaví pouze první ovladač. Tato konfigurace má tudíž synergický efekt takový, že jak úhel dopadu iontového paprsku na povrch objektu určený ke zpracování, tak také vyrovnání objektu na jak hlavní osu sloupku elektronových paprsků, tak i hlavní osu sloupku iontových paprsků lze ovlivnit nastavením jediného ovladače, a sice prvního ovladače.

Ke kontrole úspěchu výrobního postupu, to znamená ke kontrole stavu objektu při zpracování objektu iontovým paprskem, může být směřován elektronový paprsek generovaný sloupkem elektronových paprsků na objekt a mohou být detekovány elektrony vycházející od objektu. Tímto způsobem lze během zpracování objektu zachytit obrázky objektu při použití elektronového paprsku.

Na základě výhodného provedení obsahuje držák objektu nejméně jeden další ovladač, který je konfigurován k translaci druhého prvku ve vztahu k základnímu prvku v nejméně dvou, výhodně třech různých směrech. Tím může být objekt uspořádán tak, aby hlavní osa sloupku iontových paprsků a/nebo hlavní osa sloupku elektronových paprsků pronikala objektem, případně aby objekt byl umístěn ve společném pracovním rozsahu sloupku iontových paprsků a sloupku elektronových paprsků.

Objasnění výkresů

Následně jsou detailně popsána provedení podle předkládaného vynálezu ve vztahu k přiloženým výkresům.

Obrázky 1 až 5 znázorňují různá stadia objektu během výroby vzorku pro TEM;

Obrázek 6 znázorňuje držák objektu s objektem upevněným na něm;

Obrázek 7 znázorňuje prostorové uspořádání objektu znázorněného na obrázku 6 ve vztahu ke sloupcům iontových paprsků a sloupcům elektronových paprsků;

Obrázek 8 představuje zvětšené znázornění uspořádání zobrazeného na obrázku 7; a

Obrázky 9 a 10 představují prostorové uspořádání situace znázorněné na obrázcích 7 a 8 z úhlu pohledu druhé osy otáčení.

5

Příklady uskutečnění vynálezu

Obrázky 1 až 5 představují základní kroky při výrobě vzorku pro TEM. Jak je znázorněno na obrázku 1, obsahuje těleso 1, které je znázorněno přerušovanými čarami, objekt 3. Objekt 3 je objemový rozsah tělesa 1 a zahrnuje takový objemový obsah, který tvoří vzorek pro TEM.

K výrobě vzorku pro TEM je v prvním kroku objekt 3 alespoň částečně oddělen od tělesa 1. K tomuto účelu je iontový paprsek 5 směřován z více různých směrů na těleso 1, čímž se odstraní materiál z tělesa 1. Objekt 3 však není z tělesa 1 oddělen úplně, nýbrž zůstane ještě s tělesem 1 fyzicky spojen, takže těleso 1 nese objekt 3.

Ve druhém kroku je manipulátor 7 umístěn na částečně od tělesa 1 odděleném objektu 3, jak znázorňuje obrázek 2. Například je manipulátor 7 přiveden do kontaktu s objektem 3 a místo kontaktu je následně ozářeno iontovým paprskem za účelem spojení objektu 3 s manipulátorem 7. V tomto stadiu postupu je objekt 3 nesen jak tělesem 1, tak i manipulátorem 7.

Ve třetím kroku je objekt 3 od tělesa 1 zcela oddělen. K tomuto účelu je například iontový paprsek směřován na ta místa tělesa 1, která objekt 3 ještě spojují s tělesem 1. Tím je objekt 3 zcela oddělen od tělesa 1 a objekt 3 je nyní nesen výhradně manipulátorem 7. Objekt 3 lze nyní při použití manipulátoru 7 odstranit od tělesa 1.

Ve čtvrtém kroku je objekt 3 při použití manipulátoru 7 přenesen od tělesa 1 k držáku objektu. Na obrázku 3 je znázorněna část držáku objektu, která je obvykle označena jako „TEM mřížka“. TEM mřížka 9 je obvykle těleso makroskopické velikosti, které lze přepravit například pomocí pinzety.

Po přenesení objektu 3 při použití manipulátoru 7 k TEM mřížce 9 se objekt 3 například při použití iontového paprsku upevní na TEM mřížce 9, což zakončí krok týkající se přenosu.

35

V pátém kroku se manipulátor 7 uvolní od objektu 3, poté co byl objekt 3 přenesen k TEM mřížce 9. Tato situace je znázorněna na obrázku 4.

Objekt 3 obsahuje objemový rozsah, který má tvořit konečný vzorek pro TEM. Poněvadž objekt 3 není v tomto stadiu postupu výroby ještě obvykle dostatečně tenký pro analýzu pomocí TEM a vstupní plocha a výstupní plocha nejsou pro analýzu pomocí TEM ještě dostatečně hladké, je objekt 3 v šestém kroku ztenčen při použití iontového paprsku. Během ztenčování objektu 3 je iontovým paprskem odstraněn materiál z objektu.

Obrázek 5 znázorňuje objekt 3 po ztenčení. Objekt 3 má v tomto stadiu procesu výroby zpravidla plochý tvar, to znamená, že rozměr objektu 3 ve směru z je značně menší než rozměr objektu 3 ve směru x a ve směru y. Tloušťka objektu 3, to znamená rozměr objektu 3 ve směru z, činí například pouze 1000 nm nebo méně, zatímco rozměr objektu 3 ve směru x a ve směru y činí několik mikrometrů. Plocha 11 slouží při analýze objektu 3 pomocí TEM jakožto vstupní a/nebo výstupní plocha pro elektronový paprsek. K tomuto účelu musí být plocha 11 co nejhladší. Za účelem vyhlazení plochy 11, to znamená snížení drsnosti plochy 11, je plocha 11 leštěna na základě níže popsaného postupu.

Alternativně lze ztenčení a leštění provést společně v jednom společném kroku.

55

Ztenčení/leštění objektu 3 se provádí při použití systému paprsků částic, který obsahuje sloupek iontových paprsků a držák 13 objektu. Držák 13 objektu znázorněný na obrázku 6 obsahuje základní prvek 15, první prvek 17 a druhý prvek 19. Dále obsahuje držák 13 objektu první ovladač, který je konfigurován k tomu, aby se první prvek 17 otáčel vůči základnímu prvku 15 okolo první osy otáčení 21. Držák 13 objektu dále obsahuje druhý ovladač, který je konfigurován k tomu, aby se druhý prvek 19 otáčel vůči prvnímu prvku 17 okolo druhé osy otáčení 23. Držák 13 objektu může obsahovat další ovladače pro nastavení polohy a orientace základního prvku 15. První osa otáčení 21 je orientována v podstatě kolmo ke druhé ose otáčení 23. Držák 13 objektu je umístěn například ve vakuové komoře systému paprsků částic.

Objekt 3 byl upevněn v předchozím kroku na TEM mřížku 9. Přes TEM mřížku 9 se objekt 3 upevní na druhém prvku 19 držáku 13 objektu tak, aby plocha 11, která bude dále zpracována, byla orientována v podstatě kolmo ke druhé ose otáčení 23. To znamená, že pokud se druhý prvek 19 otočí vůči prvnímu prvku 17 okolo druhé osy otáčení 23, zůstane plocha 11 během otočení uvnitř jedné roviny, která stojí kolmo ke druhé ose otáčení 23 a je paralelní ke ploše 11 objektu 3.

Je nutno zdůraznit, že základní prvek 15, první prvek 17 a druhý prvek 19 tvoří kinematický řetězec, přičemž druhý prvek je posledním prvkem kinematického řetězce ve vztahu k základnímu prvku 15. To znamená, že ve vztahu k základnímu prvku 15 vykazuje druhý prvek 19 nejvíce (rotačních) stupňů volnosti pohybu. Druhý prvek 19 vykazuje u příkladu znázorněném na obrázku 6 dva (rotační) stupně volnosti pohybu ve vztahu k základnímu prvku 15, a sice stupeň volnosti otáčení okolo druhé osy otáčení 23 a stupeň volnosti otáčení okolo první osy otáčení 21 (přes první prvek 17). První prvek 17 vykazuje ve vztahu k základnímu prvku 15 jeden (rotační) stupeň volnosti pohybu, a sice stupeň volnosti otáčení okolo první osy otáčení 21.

Objekt 3 je nehybně upevněn na druhém prvku 19, to znamená, že mezi objektem 3 a druhým prvkem 19 neexistuje žádný ovladatelný stupeň volnosti pohybu. Přiměřeně tomu provede objekt 3 stejné pohyby jako druhý prvek 19.

Držák 13 objektu je přiměřeně tomu vytvořen tak, aby se druhý prvek 19 otáčel okolo první osy otáčení 21, pokud se první prvek 17 otáčí působením prvního ovladače okolo první osy otáčení 21. První prvek 17 se však neotáčí okolo druhé osy otáčení 23 v případě, že druhý prvek 19 se působením druhého ovladače otáčí relativně k prvnímu prvku 17 okolo druhé osy otáčení 23.

Obrázek 7 znázorňuje uspořádání objektu 3 ve vztahu ke sloupku 25 iontových paprsků a sloupku 27 elektronových paprsků systému paprsků částic. Přerušovaná čára 29 představuje hlavní osu sloupku 25 iontových paprsků. Přerušovaná čára 31 představuje hlavní osu sloupku 27 elektronových paprsků. Pro jednodušší znázornění zobrazuje obrázek 7 pouze první prvek 17 a druhý prvek 19 držáku 13 objektu. Dále je znázorněna druhá osa otáčení 23. První osa otáčení 21 stojí kolmo na nákresně obrázku 7.

Obrázek 8 je zvětšeným znázorněním uspořádání zobrazeného na obrázku 7 pro vysvětlení prostorových vztahů mezi objektem 3, druhou osou otáčení 23 a hlavní osou otáčení 29 sloupku 25 iontových paprsků.

První ovladač je ovládán tak, aby hlavní osa 29 sloupku 25 iontových paprsků byla k ploše 11 určené ke zpracování orientována pod malým úhlem dopadu, zatímco druhý ovladač je ovládán tak, aby druhý prvek 19 vykazoval ve vztahu k prvnímu prvku 17 první polohu otočení okolo druhé osy otáčení 23. Hlavní osa 29 sloupku 25 iontových paprsků uzavírá s plochou 11 určenou ke zpracování úhel α , který činí například nejvýše 10° . Za této podmínky dopadá iontový paprsek generovaný sloupkem 25 iontových paprsků pod plochým úhlem dopadu na plochu 11 určenou ke zpracování.

Obrázek 9 znázorňuje prostorové uspořádání, v němž druhý prvek 19 zaujímá ve vztahu k prvnímu prvku 17 první polohu otočení okolo druhé osy otáčení 23, z úhlu pohledu podél druhé osy otáčení 23. Úhel pohledu je na obrázku 8 naznačen šipkou 30.

5 Zatímco hlavní osa 29 sloupku 25 iontových paprsků je orientována k ploše 11 určené ke zpracování pod malým úhlem dopadu a druhý prvek 19 ve vztahu k prvnímu prvku 17 vykazuje první osu otáčení okolo druhé osy otáčení 23, je iontový paprsek generovaný sloupkem 25 iontových paprsků směřován na objekt 3 (přesněji řečeno na plochu 11 určenou ke zpracování). Tím se odstraní materiál z plochy 11 určené ke zpracování, čímž se sníží drsnost plochy 11.

10 Následně je první ovladač (nadále) ovládán tak, aby byla hlavní osa 29 sloupku 25 iontových paprsků orientována k ploše 11 určené ke zpracování pod malým úhlem dopadu, zatímco druhý ovladač je ovládán tak, aby druhý prvek 19 vykazoval ve vztahu k prvnímu prvku 17 druhou polohu otočení okolo druhé osy otáčení 23. Druhá poloha otočení je od první polohy otočení
15 odlišná. Převodu z první polohy otočení do druhé polohy otočení se dosáhne například tím, že druhý prvek 19 se otáčí vůči prvnímu prvku 17 okolo druhé osy otáčení 23.

Obrázek 10 znázorňuje prostorové uspořádání, v němž druhý prvek 19 vykazuje ve vztahu k
20 prvnímu prvku 17 druhou polohu otočení okolo druhé osy otáčení 23, z úhlu pohledu podél druhé osy otáčení 23. Úhel pohledu je na obrázku 8 naznačen šipkou 30. K převodu druhého prvku 19 z první polohy otočení znázorněné na obrázku 9 ve vztahu ke druhé ose otáčení 23 do druhé polohy otočení znázorněné na obrázku 10 byl druhý ovladač nastaven tak, aby druhý prvek 19 provedl vůči prvnímu prvku 17 otáčku okolo druhé osy otáčení 23. Na znázornění zobrazeném na
25 obrázcích 9 a 10 byl přiměřeně tomu druhý prvek 19, který je zobrazen šipkou 33, otočen ve směru hodinových ručiček.

Protože plocha 11 určená ke zpracování je orientována v podstatě kolmo ke druhé ose otáčení 23 (srov. obrázek 8), zůstane hlavní osa 29 sloupku 25 iontových paprsků během otáčení druhého
30 prvku okolo druhé osy otáčení k ploše 11 určené ke zpracování orientována pod malým úhlem dopadu. K převodu druhého prvku 19 z první osy otáčení do druhé osy otáčení se druhý prvek 19 otočí vůči prvnímu prvku 17 například o nejméně 5°, výhodně nejméně 10°.

Zatímco je hlavní osa 29 sloupku 25 iontových paprsků orientována k ploše 11 určené ke
35 zpracování pod malým úhlem dopadu a druhý prvek 19 ve vztahu k prvnímu prvku 17 vykazuje druhou polohu otočení, je iontový paprsek generovaný sloupkem 25 iontových paprsků směřován na objekt 3 (přesněji řečeno na plochu 11 určenou ke zpracování), čímž je materiál odnesen z objektu 3.

Výše popsaným postupem je iontový paprsek pod malým úhlem dopadu z různých směrů
40 směřován na plochu určenou ke zpracování, čímž se sníží drsnost plochy. Tímto způsobem je zakončen proces ztenčení/leštění a výroba vzorku pro TEM je ukončena.

Během převodu druhého prvku 19 z první osy otáčení do druhé osy otáčení lze iontový paprsek
45 generovaný sloupkem 25 iontových paprsků zcela nebo dočasně směřovat na objekt nebo jej na objekt nesměrovat vůbec.

Jak je znázorněno na obrázcích 7 a 8, lze objekt 3, případně ke zpracování určenou plochu 11
objektu 3 upevnit na druhém prvku 19 držáku 13 objektu tak, aby druhá osa otáčení 23 pronikala
50 objektem 3, případně ke zpracování určenou plochou 11 objektu 3. Alternativně lze, jak je znázorněno na obrázku 6, objekt 3, příp. ke zpracování určenou plochu 11 objektu 3 upevnit na druhém prvku 19 držáku 13 objektu tak, aby druhá osa otáčení 23 nepronikala objektem 3, příp. ke zpracování určenou plochou 11 objektu 3.

V souvislosti s výše popsanými provedeními byl popsán držák 13 objektu, který umožňuje pouze
55 dva stupně volnosti pohybu, a sice stupeň volnosti otáčení okolo první osy otáčení 21 a stupeň

volnosti otáčení okolo druhé osy otáčení 23. Držák objektu však může umožňovat další stupně volnosti pohybu, například translační stupně volnosti pohybu.

PATENTOVÉ NÁROKY

1. Postup výroby vzorku pro TEM, který zahrnuje:

poskytnutí systému paprsků částic, který obsahuje sloupek (25) iontových paprsků a držák (13) objektu, přičemž držák (13) objektu obsahuje základní prvek (15), první prvek (17), druhý prvek (19), první aktor a druhý aktor, přičemž první aktor je konfigurován k tomu, aby se první prvek (17) otáčel vůči základnímu prvku (15) okolo první osy otáčení (21), přičemž druhý aktor je konfigurován k tomu, aby se druhý prvek (19) otáčel vůči prvnímu prvku (17) okolo druhé osy otáčení (23), a přičemž je první osa otáčení (21) orientována v podstatě kolmo ke druhé ose otáčení (23);

přičemž postup dále zahrnuje:

upevnění objektu (3) na druhém prvku (19) držáku (13) objektu tak, aby ke zpracování určená plocha (11) objektu (3) byla orientována v podstatě kolmo ke druhé ose otáčení (23); a

vyrobení vzorku pro TEM leštěním objektu (3), přičemž leštění zahrnuje:

– ovládání prvního aktoru tak, že hlavní osa (29) sloupku (25) iontových paprsků je orientována pod plochým úhlem dopadu (α) k ploše (11) určené ke zpracování, a druhého aktoru tak, aby druhý prvek (19) zaujímal ve vztahu k prvnímu prvku (17) první polohu otáčení okolo druhé osy otáčení (23);

– směřování iontového paprsku generovaného sloupkem (25) iontových paprsků na objekt (3), zatímco hlavní osa (29) sloupku (25) iontových paprsků je orientována pod plochým úhlem dopadu (α) k ploše (11) určené ke zpracování a druhý prvek (19) zaujímá ve vztahu k prvnímu prvku (17) první polohu otáčení okolo druhé osy otáčení (23),

vyznačující se tím, že uvedené leštění dále zahrnuje:

– ovládání prvního aktoru tak, aby hlavní osa (29) sloupku (25) iontových paprsků byla orientována pod plochým úhlem dopadu (α) k ploše (11) určené ke zpracování, a druhého aktoru tak, aby druhý prvek (19) zaujímal ve vztahu k prvnímu prvku (17) druhou polohu otáčení okolo druhé osy otáčení (23), přičemž druhá poloha otáčení je od první polohy otáčení odlišná; a

– směřování iontového paprsku generovaného sloupkem (25) iontových paprsků na objekt (3), zatímco hlavní osa (29) sloupku (25) iontových paprsků je orientována pod plochým úhlem dopadu (α) k ploše (11) určené ke zpracování a druhý prvek (19) zaujímá ve vztahu k prvnímu prvku (17) druhou polohu otáčení okolo druhé osy otáčení (23).

2. Postup podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že objekt (3) je na druhém prvku (19) upevněn tak a držák (13) objektu je vytvořen tak, aby mezi objektem (3) a druhým prvkem (19) neexistoval žádný ovladatelný stupeň volnosti pohybu.

3. Postup podle nároku 1 nebo 2, **vyznačující se tím**, že držák (13) objektu je vytvořen tak, aby mezi druhým prvkem (19) a prvním prvkem (17) neexistoval žádný další ovladatelný rotační stupeň volnosti pohybu.

4. Postup podle některého z nároků 1 až 3, **vyznačující se tím**, že držák (13) objektu je vytvořen tak, aby se druhý prvek (19) otáčel okolo první osy otáčení (21) v případě, že se první prvek (17) otáčí okolo první osy otáčení (21) a/nebo

držák (13) objektu je vytvořen tak, aby se první prvek (17) neotáčel okolo druhé osy otáčení (23) v případě, že se druhý prvek (19) otáčí okolo druhé osy otáčení (23).

5. Postup podle některého z nároků 1 až 4, **vyznačující se tím**, že se první poloha otáčení liší od druhé polohy otáčení o nejméně 5°, s výhodou nejméně o 10° a/nebo nejvýše o 45°, s výhodou nejvýše o 35°.

6. Postup podle některého z nároků 1 až 5, **vyznačující se tím**, že iontový paprsek je směřován alespoň dočasně na objekt (3), zatímco druhý prvek (19) se otáčí z první polohy otáčení do druhé polohy otáčení okolo druhé osy otáčení (23).

7. Postup podle některého z nároků 1 až 5, **vyznačující se tím**, že iontový paprsek není směřován na objekt (3), zatímco druhý prvek (19) se otáčí z první polohy otáčení do druhé polohy otáčení okolo druhé osy otáčení (23).

8. Postup podle některého z nároků 1 až 7, **vyznačující se tím**, že dále zahrnuje:

alespoň částečné oddělení objektu (3) od tělesa (1) při použití iontového paprsku (5) generovaného sloupkem iontových paprsků;

umístění manipulátoru (7) na částečně odděleném objektu (3);

úplné oddělení objektu (3), na němž je umístěn manipulátor (7), od tělesa (1);

přenos objektu (3) z tělesa (1) k držáku (13) objektu při použití manipulátoru (7);

uvolnění manipulátoru (7) od objektu (3) po uvedeném upevnění objektu (3) na druhém prvku (19) držáku (13) objektu;

ztenčení a/nebo provedení leštění objektu (3) upevněného na druhém prvku (19) při použití iontového paprsku generovaného sloupkem (25) iontových paprsků.

9. Postup podle některého z nároků 1 až 8, **vyznačující se tím**, že objekt (3) je upevněn na druhém prvku (19) tak, aby úhel mezi plochou (11) určenou ke zpracování objektu (3) a druhou osou otáčení (23) činil nejméně 80° , s výhodou nejméně 85° , dále s výhodou nejméně 89° .

10. Postup podle některého z nároků 1 až 9, **vyznačující se tím**, že první aktor je ovládán tak, aby hlavní osa (29) sloupku (25) iontových paprsků uzavírala s plochou (11) určenou ke zpracování úhel (α), který činí nejvýše 10° .

11. Postup podle některého z nároků 1 až 10, **vyznačující se tím**, že postup před uvedeným leštěním objektu (3) dále zahrnuje vyrovnání základního prvku (15) tak, aby první osa otáčení (21) byla v podstatě orientována kolmo k hlavní ose (29) sloupku (25) iontových paprsků.

12. Postup podle některého z nároků 1 až 11, **vyznačující se tím**, že systém paprsků částic dále obsahuje jeden sloupek (27) elektronových paprsků, přičemž hlavní osa (31) sloupku (27) elektronových paprsků a hlavní osa (29) sloupku (25) iontových paprsků v podstatě leží v jedné společné rovině a pronikají jedním společným pracovním rozsahem;

přičemž postup před uvedeným leštěním objektu (3) dále zahrnuje:

vyrovnání základního prvku (15) tak, aby první osa otáčení (21) byla orientována v podstatě kolmo ke společné rovině.

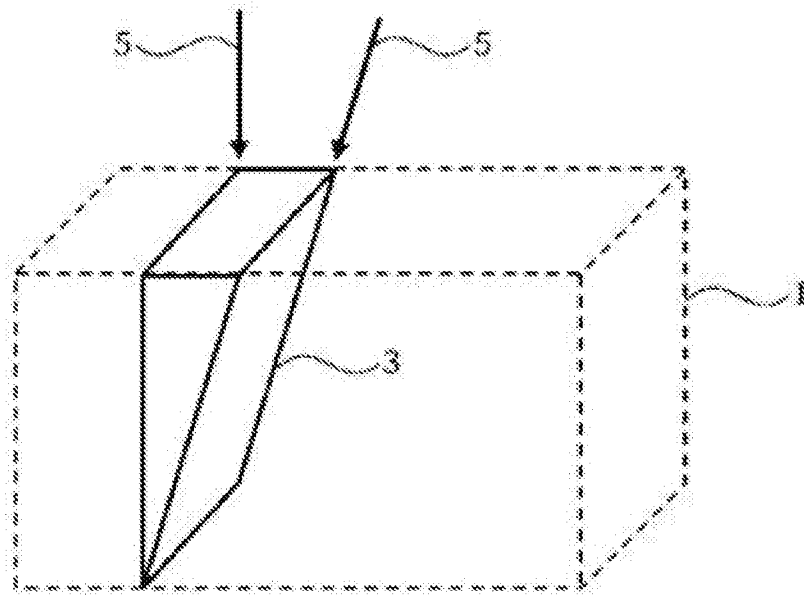
13. Postup podle nároku 12, **vyznačující se tím**, že dále zahrnuje:

směrování elektronového paprsku generovaného sloupkem (27) elektronových paprsků na objekt (3) a detekci elektronů vycházejících z objektu (3).

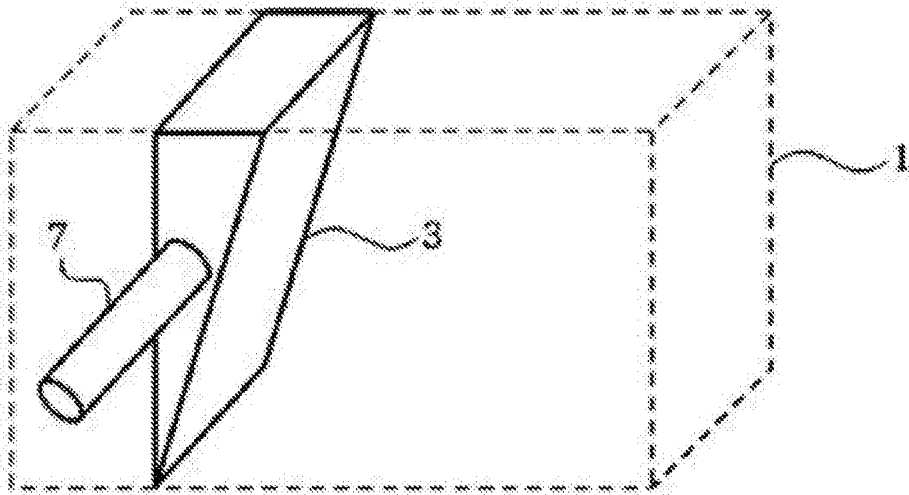
14. Postup podle některého z nároků 1 až 13, **vyznačující se tím**, že držák (13) objektu obsahuje nejméně jeden další aktor, který je konfigurován k tomu, aby byl druhý prvek (19) ve vztahu k základnímu prvku (15) přenesen do nejméně dvou různých směrů; a

příčemž postup dále zahrnuje:

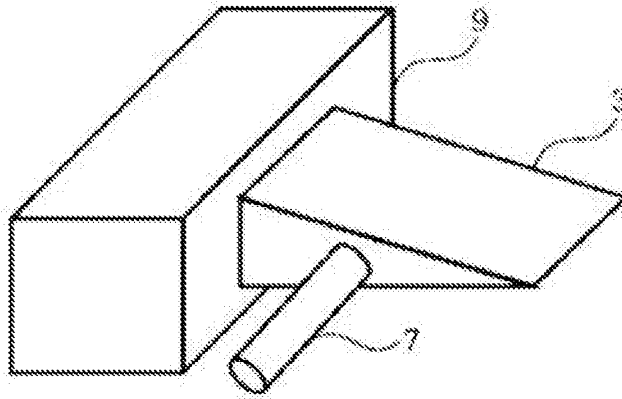
ovládání alespoň jednoho dalšího akтору držáku (13) objektu tak, aby hlavní osa (29) sloupku (25) iontových paprsků pronikala objektem (3).



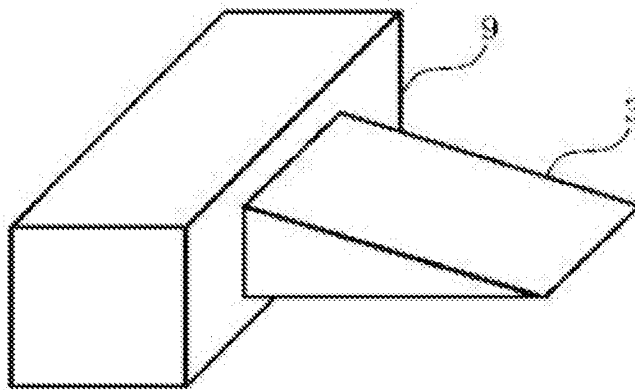
Obr. 1



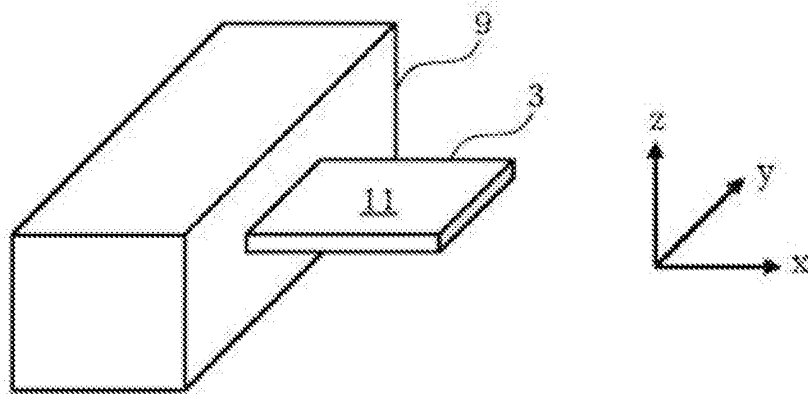
Obr. 2



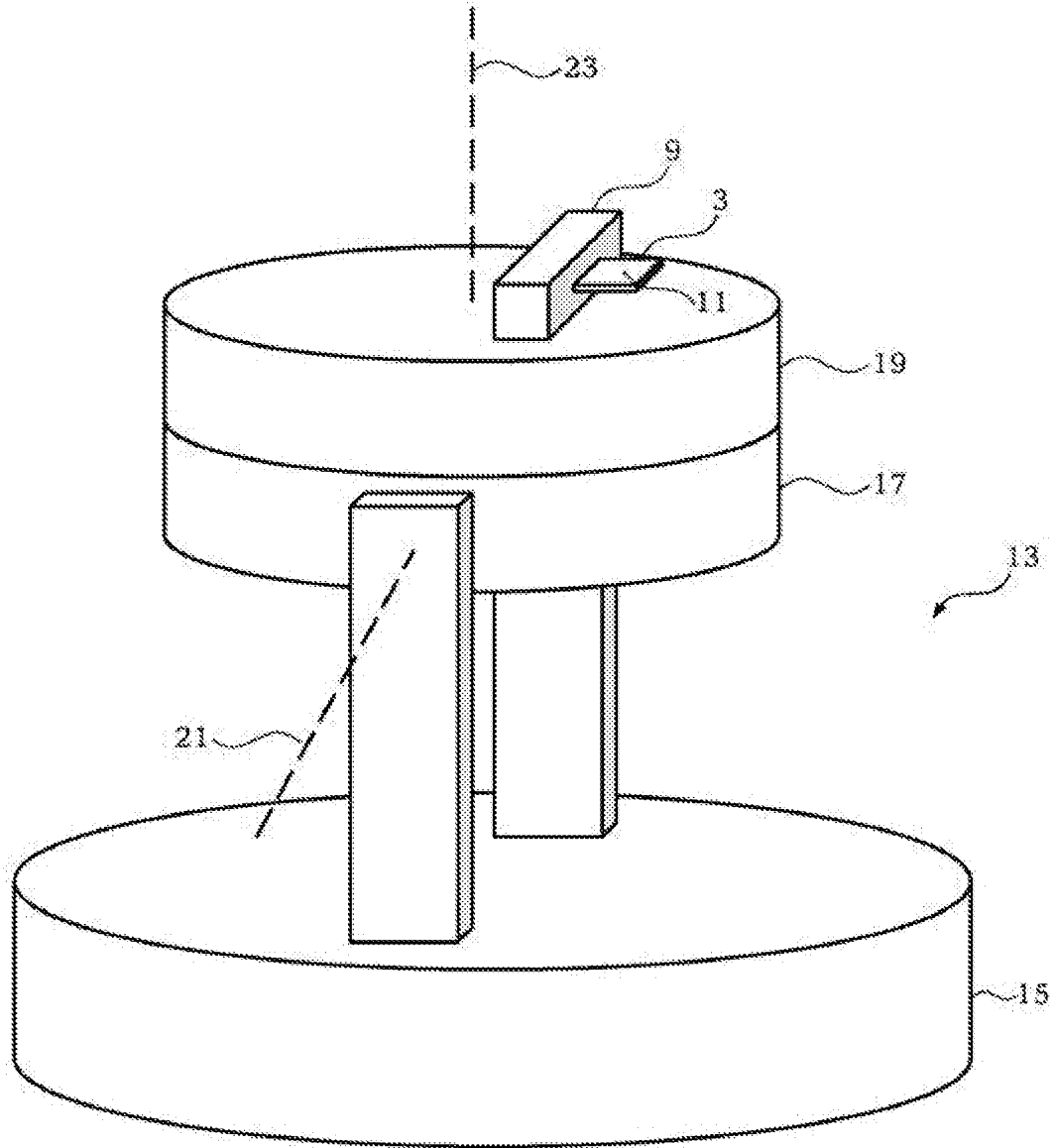
Obr. 3



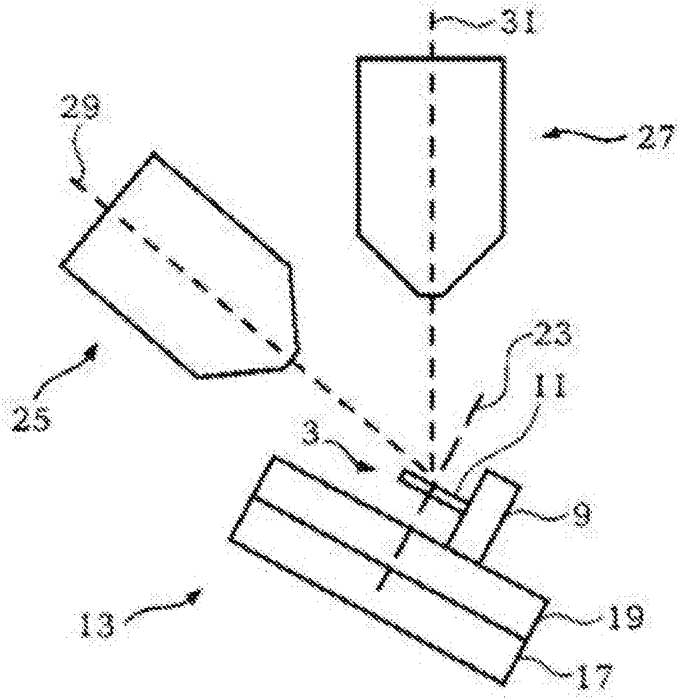
Obr. 4



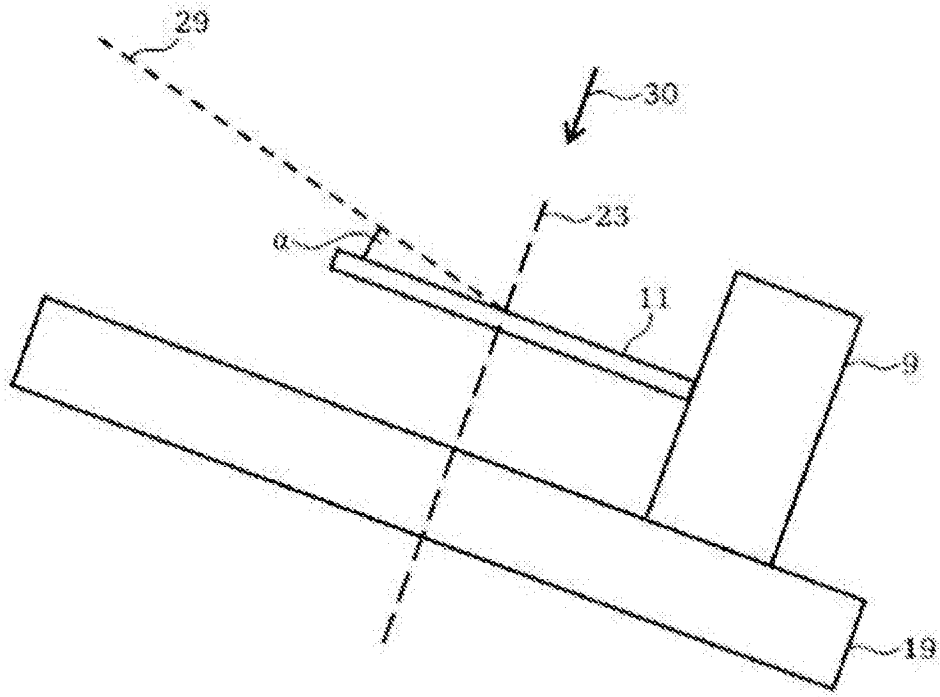
Obr. 5



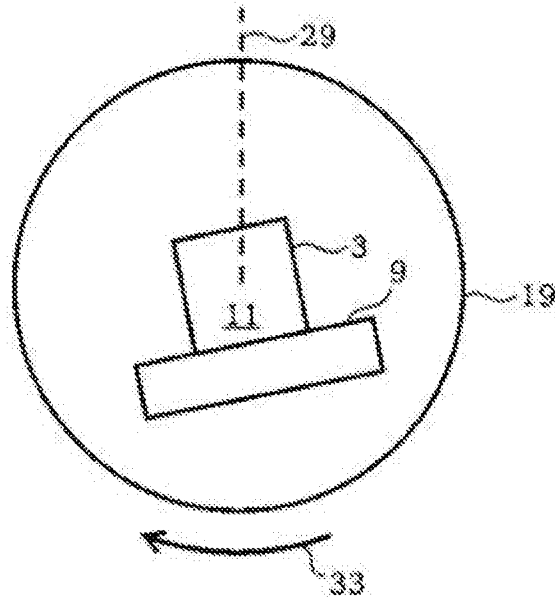
Obr. 6



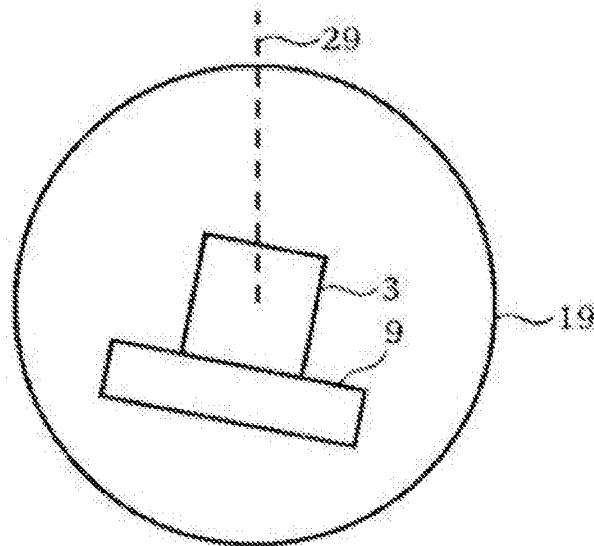
Obr. 7



Obr. 8



Obr. 9



Obr. 10