

2.2 Nonlinearity skeneru

V prvním přiblížení lze předpokládat, že výchylka piezoelektrického skeneru je lineární funkcí přiváděného napětí. Následující vztah popisuje ideální vztah mezi výchylkou a intenzitou elektrického pole

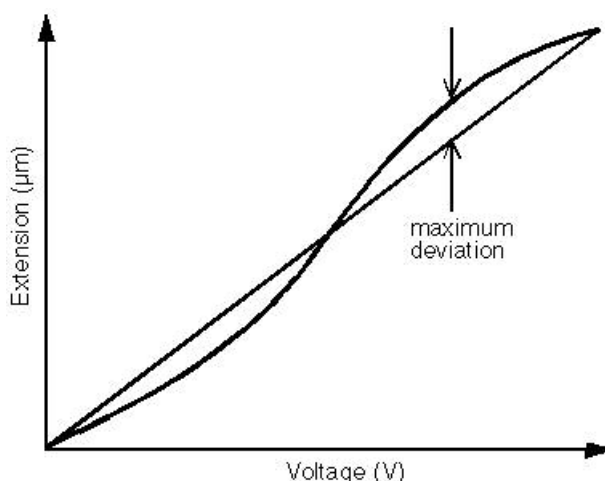
$$s = d \cdot E,$$

kde s je deformace v nm /V, E je elektrické pole ve V/m, a d je deformační koeficient v nm/V, který charakterizuje příslušný piezoelektrický materiál. Reálně piezoelektrický skener nerespektuje tento vztah a je ovlivněn některými poruchovými faktory jako jsou:

- 2.2.1 Vlastní nelinearita skeneru
- 2.2.2 Hystereze
- 2.2.3 Creep
- 2.2.4 Stárnutí
- 2.2.5 Křížová vazba

2.2.1 Vlastní nelinearita

Předpokládejme, že přiváděné napětí se postupně zvyšuje od nuly do konečné hodnoty. Pokud znázorňujeme extenzi jako funkci přiváděného napětí, grafem nebude ideální přímka ale křivka ve tvaru S, jak je patrné z grafu na obr. 2-3.



Obr. 2-3 Vlastní nelinearita skeneru

Vlastní nelinearita skeneru spočívá v poměru maximální výchylky y od lineárního (ideálního) průběhu k y posuvu skeneru při stejném napětí. Jinými slovy, nelinearita je vyjádřena jako dy/y . Vlastní nelinearita piezoelektrických materiálů se pohybuje v mezích od 2% do 25 %.

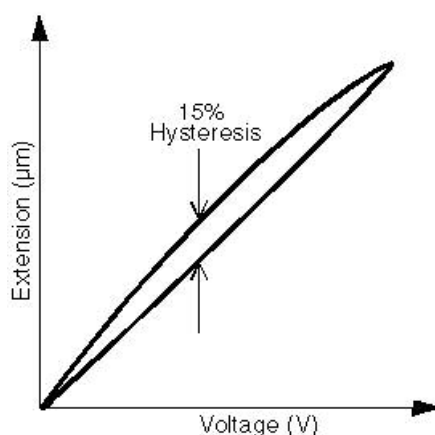
V rovině povrchu vzorku se efekt vlastní nelinearity projeví deformací (zkroucením) osnovy měřících bodů (obr. 2-1). Protože se skener nepohybuje rovnoměrně k přiváděnému napětí, budou mezi jednotlivými body různé vzdálenosti, což se v obraze projeví zakřivením rovinné plochy. I přes vlastní nelinearitu skeneru nemusí být u členitých povrchů odchylka od ideálního stavu viditelná.

Kolmo k rovině povrchu (z-posuv), způsobí vlastní nelinearita chyby při měření výšky. Výška je obvykle pro SPM kalibrována rastrováním vzorku při známém výškovém

kroku. Kalibrační koeficient je určen odečtením napětí přivedeného na elektrodu a napětí ze z elektrody při překonání daného úseku.

2.2.2 Hystereze

Další komplikující fakt je, že piezoelektrická keramika vykazuje hysterezi. Předpokládejme, že začínáme přiváděné napětí postupně zvyšovat od nuly do konečné hodnoty a vzápětí ho budeme snižovat zpět k nulové hodnotě. Pokud sestojíme graf roztažnosti keramického materiálu jako funkci přivedeného napětí, nebude sestupná část křivky kopírovat vzestupnou část křivky. Nově vzniklá dráha (viz. obr. 2–4) vzniká v důsledku hystereze keramického materiálu.

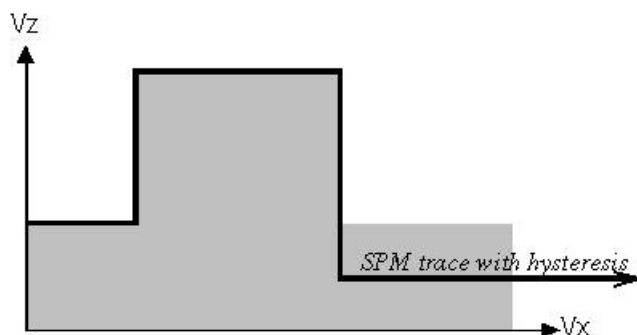


Obr. 2-4. Hystereze skeneru

Hystereze piezoelektrického skeneru je poměr maximální odchylky mezi oběma částmi křivky k maximálnímu zvětšení, které může být napětím ve skeneru dosaženo. Hystereze může dosahovat až 20%.

Jak je uvedeno v úvodu této kapitoly, SPM hodnoty jsou nabírány v jednom směru z důvodu minimalizace registračních chyb způsobených hysterezí skeneru. Hystereze ve směru kolmém k rovině vzorku způsobuje chybný profil, jak znázorňuje obr. 2-5. S odvoláním na křivku na obr. 2-4 vidíme, že jestliže se skener pohybuje nahoru v kroku směrem z, je třeba určité napětí ke kontrakci skeneru. Oproti tomu, při sestupu dolů o stejný krok (kdy se skener roztáhne) je na extenzi spotřebováno větší napětí než pro kontrakci pro stejnou změnu polohy.

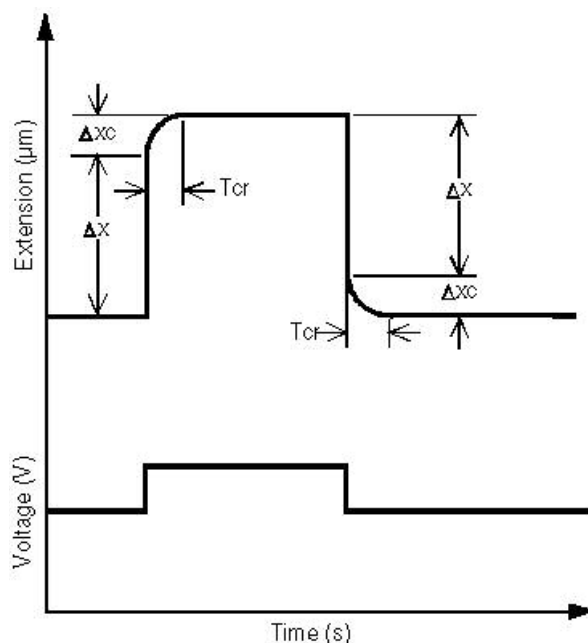
Pokud je SPM obraz rekonstruován na základě napětí přivedeného na skener, bude obrys vypadat podle obr. 2- 5. Z obrázku je zřejmý vliv hystereze na zobrazení ideálního pravoúhlého stupně.



Obr. 2-5. Vliv hystereze na stupeň

2.2.3 Creep

Když je skener vystaven náhlé změně napětí, piezoelektrický materiál nereaguje najednou. Odpovídající změny rozměru skeneru nastanou ve dvou krocích. První krok proběhne během několika milisekund a druhý během mnohem delšího časového úseku. Druhý krok, označený v obrázku 2-6 jako Δx_c je znám jako creep.

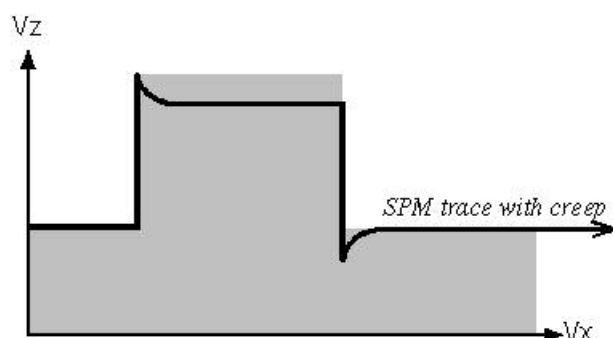


Obr. 2-6. Graf ukazující creep skeneru

Kvantitativně můžeme creep vyjádřit poměrem extenzí – $\Delta x_c / \Delta x$. Creep je vyjadřován v procentech a obvykle je charakterizován časovým intervalem T_{cr} , během kterého ke creepu dojde. Typická hodnota je 1% až 2% v čase T_{cr} od 10 do 100 sekund. Na obr. 2-6 je znázorněn průběh extenze s vyznačeným creepem v závislosti na napětí přiváděném na hrot. Vlivem creepu mohou obrázky pořízené při různých skenovacích rychlostech vykazovat různá zvětšení.

Vliv creepu se může projevit zejména při zvětšení detailů v rovině vzorku. Předpokládejme tedy tuto situaci. Najdeme vhodný detail při menším zvětšení (při skenování větší plochy), vybereme detail v rohové části plochy, přesuneme skener do této pozice a chceme v této pozici detail odpovídajícím způsobem zvětšit. Elektronika SPM přístroje následně vyvolá napětí k přesunu skeneru do nové centrované pozice. Protože je však aplikován na skener náhlý napěťový impuls, creep v rovině vzorku způsobí, že netrefíme cílovou pozici. Pokud budeme pokračovat ve skenování plochy beze změny napětí, skener se bude dále postupně uvolňovat (nastává creep). Pochod může trvat řádově minuty.

K objasnění creepu ve směru osy z , uvažujme opět pravoúhlý stupeň (viz. obr. 2-7). Hrot traverzuje stupeň od spodu nahoru, skener se smršťuje pod vlivem napětí korespondujícího s výškou celého stupně. Nicméně během několika dalších sekund, kdy dochází ke creepu, skener pokračuje pomalu v kontrakci. K dosažení kontaktu hrotu s povrchem musí SPM nastavit napětí ve směru opačném tak, aby působilo proti creepu.

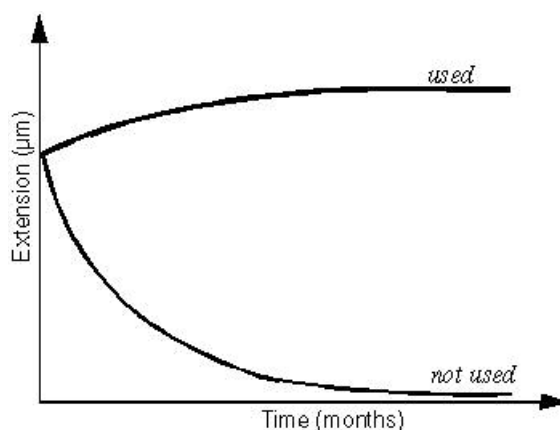


Obr. 2-7. Změna tvaru stupně s creepem

Vliv creepu na zobrazení pravoúhlého schodu (stupně) je idealizovaný příklad. Typičtější příklad z praxe představuje zobrazení polycrystalického materiálu, jehož zrna jsou tvořena plochami skloněnými pod různými úhly. V důsledku creepu je SPM obraz zpravidla ovlivněn tak, že na jedné straně vyvýšeniny jsou světlé stíny a na druhé jsou tmavé stíny.

2.2.4 Stárnutí

Deformační koeficient – d piezoelektrického materiálu se mění exponenciálně s časem a dobou používání. Graf na obr. 2 – 8 znázorňuje stárnutí piezoelektrického skeneru v případě použití nižšího a vyššího napětí.



Obr 2-8. Stárnutí skeneru při užívání a nečinnosti.

Stárnutí skeneru je v grafu vyjádřeno změnou koeficientu napjatosti za určitý čas. Stárnutí může způsobit chyby v měření délek. Pokud je skener užíván pravidelně, odchylky

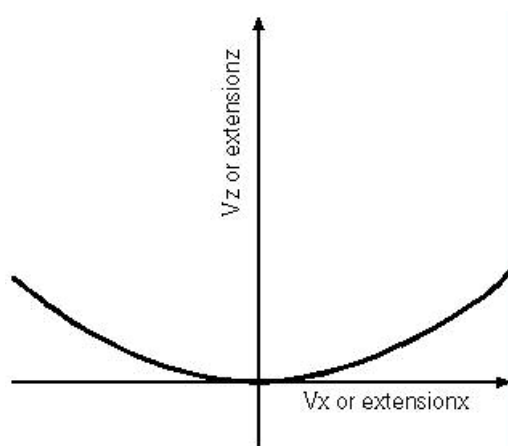
extenze pro daná napětí se pomalu zvyšují s dobou a frekvencí používání. V době kdy skener není používán, se změna extenze skeneru snižuje exponenciálně. Oba tyto jevy jsou součástí procesu stárnutí.

S odvoláním na úvod kapitoly 2. 1. připomeňme, že piezoelektrické materiály jsou materiály keramické a tedy polykrystalické. Každý malý krystal, který je součástí slinutého skeneru má svůj vlastní dipólový moment. Opakovaným přiváděním napětí v jednom směru (situace, kdy je napětí přiváděné na skener při skenování), dochází ke stále častějšímu pólování domén v příslušných směrech skenování. Četné dilatace skeneru při skenování, úměrné přivedenému napětí, polarizují dipóly v daných směrech. Z obrázku vyplývá, že čím častěji (déle) je skener používán, tím většího rozsahu pohybu je schopen.

Na druhé straně, pokud skener není často používán, dipólové momenty se budou znovu orientovat nahodile. Výsledkem je, že jen několik dipólů bude přispívat k výchylce skeneru. Při pořízení SPM, je vždy skener pólován a amplituda odchylky je vždy maximální. Závislost extenze skeneru na čase a době používání vypovídá, že skener prakticky nemůže dosáhnout maximální výchylky jakou měl v době první kalibrace. Pokud analyzujeme povrch v SPM, délkové hodnoty v příčném a vertikálním směru vykazují jistou chybu.

2.2.5 Křížová vazba

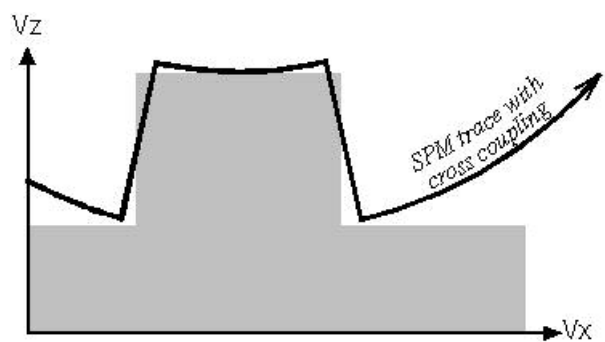
Pojem křížová vazba vypovídá o tendenci skeneru pohybovat se v osách x nebo y s falešnou z -tovou složku, viz. obr. 2-9. Ta může mít několik příčin. Například, elektrické pole podél skeneru není stejnorodé. Deformační (napětíová) pole nejsou konstantní a není je možné popsat vektorovou veličinou. Ve skutečnosti se jedná složité tenzory. Geometrická křížová vazba má svou podstatu ve způsobu konstrukce piezoelektrického skeneru, který má nejčastěji podobu segmentované trubičky nebo trojnožky.



Obr. 2-9. Křížově vázaný pohyb skeneru

Pohyb skeneru ve směru $x - y$ je uskutečněn, pokud se jedna strana válce stahuje (kontrakce) a druhá napíná (extenze). Výsledkem je, že skener se ve skutečnosti nepohybuje se v požadované rovině, ale pohybuje po obloukové dráze. Napětí potřebné pro pohyb piezoelektrické trubičky podél osy x a y (rovnoběžně s povrchem vzorku) vyžaduje k udržení kontaktu hrotu s povrchem vzorku ještě extenzi případně kontrakci podél osy z (kolmo k povrchu vzorku).

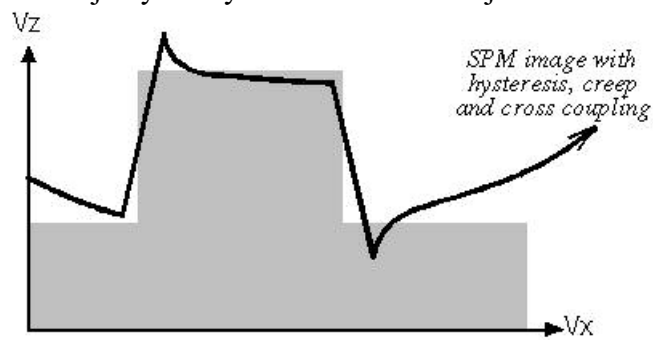
Skener v podobě „trojnožky“ je konstruován tak, že se vzájemně na jednom konci spojí tři tyčinky nebo trubičky z piezoelektrického materiálu. Tato konstrukce rovněž vytváří křížovou vazbu, protože tři části skeneru z piezoelektrického materiálu jsou propojeny navzájem. Když se „x“ tyčinka rozepne nebo stáhne, způsobí to rotaci kolem „y“ a „z“ os tyčinek. Toto spojení, vedoucí ke „křížové vazbě“ může vést u SPM ke vzniku „miskovitého“ zkreslení obrazu, jak je vidět na obr. 2-10 opět na příkladu obrazu pravoúhlého stupně.



Obr. 2-10. Jev křížové vazby na stupěň

Při interpretaci obr. 2-10 si musíme uvědomit, že SPM obraz vychází z napětí potřebného ke kompenzaci zakřivení, které vede k obloukovému pohybu skeneru. Miskové zkreslení nemusí být vždy v konečném obraze zřejmé, protože může být eliminováno následným zpracováním obrazu s použitím vhodného počítačového programu. Softwarová korekce, po kalibraci skeneru zobrazením povrchu o známé křivosti (čočky), může obraz vyrovnat. Skutečná křivost čočky však může být měřena pouze v případě, kdy je eliminován vliv křížové vazby.

V této sekci byl odděleně popsán vliv hystereze, creepu a křížové vazby na zobrazení pravidelného, pravoúhlého stupně. Ve skutečnosti se tyto jevy objevují současně. Obr. 2-11 ukazuje výsledný efekt všech těchto jevů.



Obr.2-11 Vliv hystereze, creepu a křížové vazby na obraz stupně

Některé systémy mohou řešit vady zobrazení namísto softwarovou korekcí hardwerovou korekcí, která eliminuje nelinearity. Korekce používají optickou, kapacitní a tenzometrickou technologii. Nejlepší systémy kombinují jak softwarovou, tak i hardwerovou korekci.