

Nano-aandrijvingen

Atomaire precisie bij millimeters slag

Volker Klocke, Stephan Kleindiek Met piëzo-elektrische kristallen kunnen minimum verplaatsingen van enkele nanometers gerealiseerd worden. De maximum slag is echter beperkt tot enkele micrometers, wat als een belangrijke beperking wordt ervaren. Voor grove positionering zijn verplaatsingen van millimeters noodzakelijk bij een acceptabele snelheid. Tot nu toe moest daartoe een extra aandrijving worden aangebracht. De hier besproken nanomotor heeft beide eigenschappen en is de kleinste aandrijfeenheid die een slag van millimeters combineert met atomaire precisie.

Ondanks zijn geringe afmetingen – diameter kleiner dan 4 mm, lengte 15 mm – is de nanomotor robuust doordat hij een kracht tot 30 mN (3 gram) kan leveren, zie figuur 1. Deze kracht is voldoende om met een naald met een puntradus van 1 μm een elektrisch geleidend spoor in een chip door te snijden. Zijdelings kan de nanomotor met 500 mN (50 gram) belast worden, wat in veel situaties voldoende is voor positioneerdoeleinden. De motor is bovendien geschikt voor toe-

passing in vacuumsystemen. Al deze eigenschappen openen grote toepassingsmogelijkheden in vakgebieden als nanotechnologie, micromechanica en microsysteemtechniek, communicatietechniek, halfgeleidertechniek, elektronenmicroscopie, microbiologie en vele andere. Het bereik en de precisie van de nanomotor verschillen meer dan zes orden van grootte. Dit wordt bereikt door twee verschillende methoden van elektrische aansturing.

- **Fijnpositionering met nanometer precisie**

De buitenmantel van de piezomotor bestaat uit een piezobuis die uitzet wanneer op de beide elektroden een spanning wordt gezet. Tijdens het uitzetten wordt de centrale as in lengterichting meegenomen. De grootte van de beweging bedraagt 10 nm per volt.

Wanneer de piezo met een PC-kaart wordt gestuurd, met 8-bit resolutie en een spanningsbereik van min 15 tot plus 15 V, dan ligt de positioneer-nauwkeurigheid bij circa 1 nm. Wanneer met een fijn regelbare analoge spanning wordt aangestuurd, is een resolutie van minder dan 0,01 nm mogelijk, zoals blijkt uit het beeld dat met een rastertunnelmicroscopie gemaakt is, zie figuur 4. Er is een grens aan de elektrische spanning waarmee de piezo kan worden aangestuurd. Deze grens ligt bij enkele honderden volts, wat overeen komt met een slag van circa 10 μm . Wanneer grotere afstanden moeten worden overbrugd, dan kan de nanomotor in een grovestappen-modus worden aangestuurd.

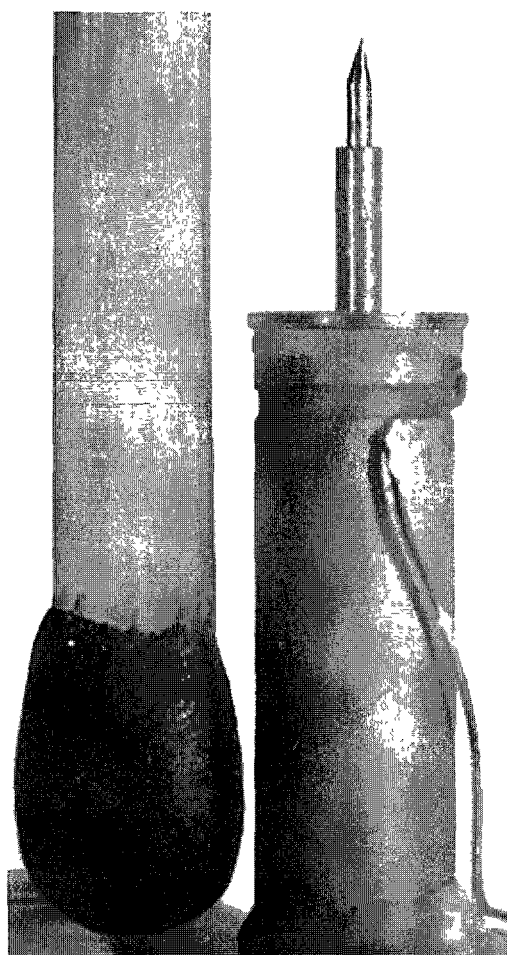
- **Grove stappen tot in het mm-bereik**

Wanneer de piezobuis met een pulserende spanning wordt aangestuurd, dan ontstaat een soort stappenmotor. De centrale as kan door zijn traagheid de snelle beweging van de piezobuis niet meer volgen en verschuift bij elke puls een stukje ten opzichte van de in de piezobuis gemonteerde glijbus. Door dit regelmatig te herhalen kan de verplaatsing van de centrale as oplopen tot enkele millimeters. De verschuivingen zijn

Figuur 1

De nanomotor vergelijkenderwijs

Foto's Volker Klocke & Stephan Kleindiek
Nanotechnologie

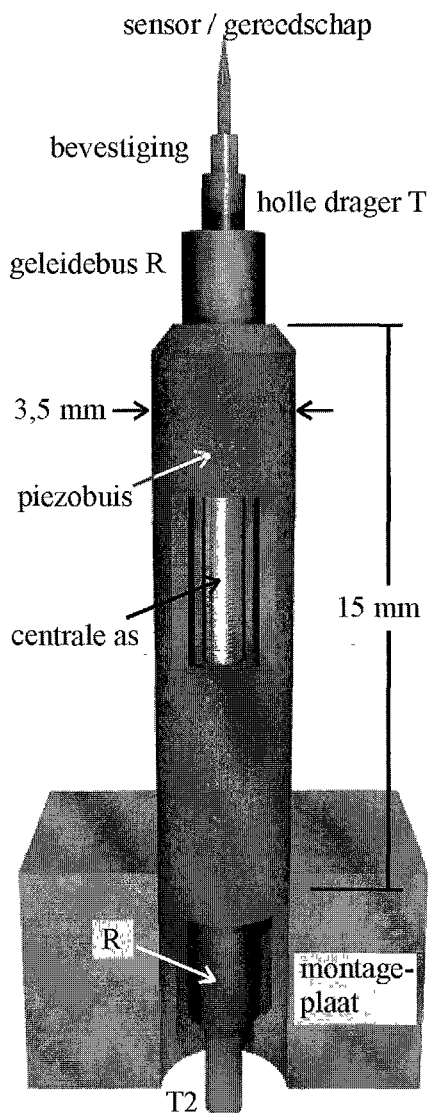


Atomaire precisie bij millimeters slag

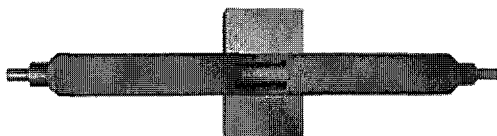
gelijkmatig, maar niet gekalibreerd. De fijnbeweging is groter dan de grove beweging, zodat elke positie in lengterichting bereikt kan worden. Bij een stuurspanning die loopt van -15 tot +15V is het bereik van de fijnpositionering circa 300 nm terwijl de grove stap circa 100 nm bedraagt.

Door het asymmetrische signaal op de piezobuis om te keren kan de bewegingsrichting van de centrale as worden omgekeerd.

Figuur 2
Opbouw en afmetingen
van de nanomotor



Figuur 3
Een tweezijdige nanomotor



Opbouw van de nanomotor

Zie figuur 2. In het midden zit de centrale as die in de glijbus in lengte richting op en neer of heen en weer gaat. Op het buiten de motor stekende deel is een buisje bevestigd dat dienst doet als drager voor het bevestigen en aansluiten van een kleine sensor of een klein gereedschap, dat daardoor makkelijk gewisseld kan worden. Voorbeelden van sensoren en gereedschappen zijn: een elektrode, een scherpe punt voor tunnelmicroscopie, een glasvezel, een canule of een slang. Een slang of draad kan door de motor heen worden gestoken. De buitenbus om de glijbus is van piezomateriaal en oefent bewegingskrachten uit op de glijbus die ze doorgeeft aan de centrale as, waardoor deze transleert. De motor wordt gemonteerd op een materiaal met hogere dichtheid, zoals staal of messing om de terustoot van de traagheidsaandrijving op te vangen. Door twee nanomotoren in elkaars verlengde te koppelen, zie figuur 3, met een doorlopende glijbus is een verplaatsing van de centrale as tot centimeters mogelijk.

Toepassingsgebieden

De mogelijke toepassingen van de nanomotor zijn veelvuldig. Zo kan deze minuscule aandrijving gebruikt worden voor het bewegen van spiegels voor interferometrie of het manipuleren van minuscule monsters onder de microscoop. Doordat de motor in het vacuüm toepasbaar is, opent dit mogelijkheden voor het manipuleren van monsters bij elektronenmicroscopie. Een andere toepassing is het uiterst nauwkeurig positioneren van hoogfrequent-resonators in golfpijpen. Ook het toepassen van microrobots wordt mogelijk door met nanomotor en aangedreven grijpers en portaalsystemen. Verdere lonende applicaties zijn het met zeer hoge precisie maken van elektrische contacten met een object. Als positionersysteem voor glasvezels voor bijvoorbeeld vezelkoppelingen, voor het (magneto)-optisch beschrijven en lezen van informatie, of voor fluorescentie-analysesystemen, ondervindt de nanomotor nagenoeg geen concurrentie. Iets exotischer, maar veelbelovend zijn het ritzen, bonden, lassen of eroderen bij de fabricage van maskers in de halfgeleiderindustrie, evenals het trimmen van sensoren en geleidende sporen. Tenslotte is het met de nanomotor mogelijk om structuren met afmetingen in het nanometergebied te maken, die gebruikt kunnen worden voor (kwantummechanische) bouwstenen, sensoren of buigingsrasters. Wanneer de nanomotor met een passende sensor aan de punt wordt uitgerust, dan kan hij dienen als elektrische, magnetische, optische of chemische mini-monster analyser. Wanneer in plaats van kogellagers, scharnieren of geleidingen nanomotoren wor-

Atomaire precisie bij millimeters slag

den toegepast, dan heeft men geen omkeerspel en kan men toch gebruik maken van de nanomotereigenschappen. een slag van mm's met nanometerprecisie.

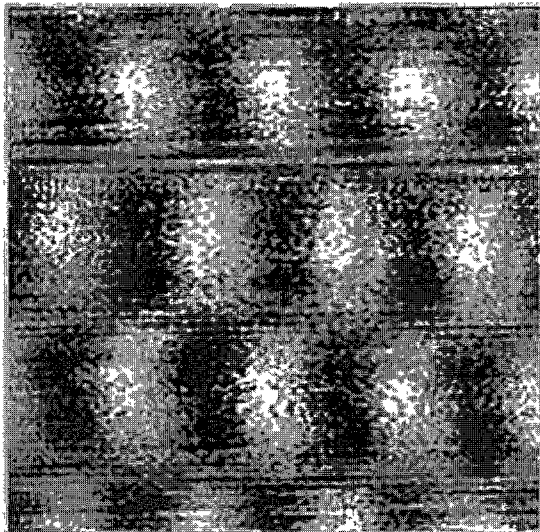
Toepassingsvoorbeelden

Rastertunnelmicroscop

Met een rastertunnelmicroscop is het mogelijk een beeld op atomaire schaal van een oppervlak te maken. Daartoe wordt een zeer fijne naald over het oppervlak getrokken. De naald is zeer scherp en de punt bestaat slechts uit een enkel atoom. Daardoor is het mogelijk de atomen in het te onderzoeken materiaal waar te nemen doordat de naald een 'hobbel' in het oppervlak ziet. Deze 'hobbel' is het gevolg van de atomaire krachten die werken tussen de naaldpunt en de atomen in het afgetaste oppervlak. Door elektronische versterking wordt het meetsignaal zichtbaar gemaakt.

Figuur 4

Grafietatomen, opgenomen met de kleinste commercieel verkrijgbare rastertunnelmicroscop. Beeldafmetingen 1×1 nanometer



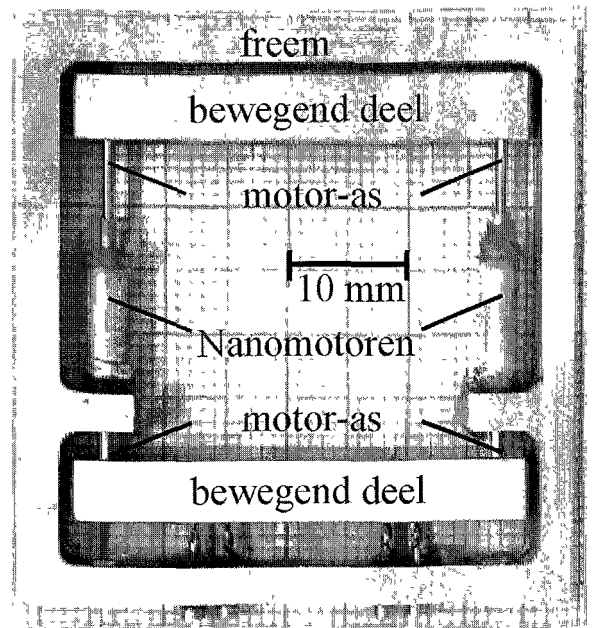
Miniatuur rastertunnelmicroscop

Figuur 7b toont de combinatie van een nanomotor met een buisvormige xy-tafel uit piezomateriaal. Dit xyz-positioneersysteem is kleiner dan een vingerhoed, zodat mechanische trillingen van buitenaf nauwelijks van invloed zijn.

Daarmee kan atomaire resolutie bereikt worden zonder dempingssystemen, zoals blijkt uit de ongefiltreerde weergave van individuele atomen in figuur 4.

Positioneersysteem

In de hoogfrequentietechniek wordt een frequentie afstelling van (sub-)millimetergolven gerealiseerd door een folie door een sleuf in een holle geleider te schuiven. Figuur 7a toont de oplossing van dit probleem door toepassing van een nanomotor. De positie van de nanomotor wordt gekalibreerd door elektrische eind-aanslagen, waardoor de foliepositie en daarmee de frequentie zeer nauwkeurig is in te stellen.

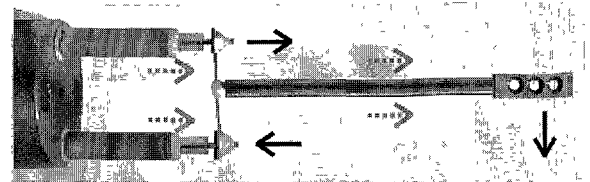


Figuur 5

Een positioneeretafel met een bereik van 5 mm en nanometer-precisie

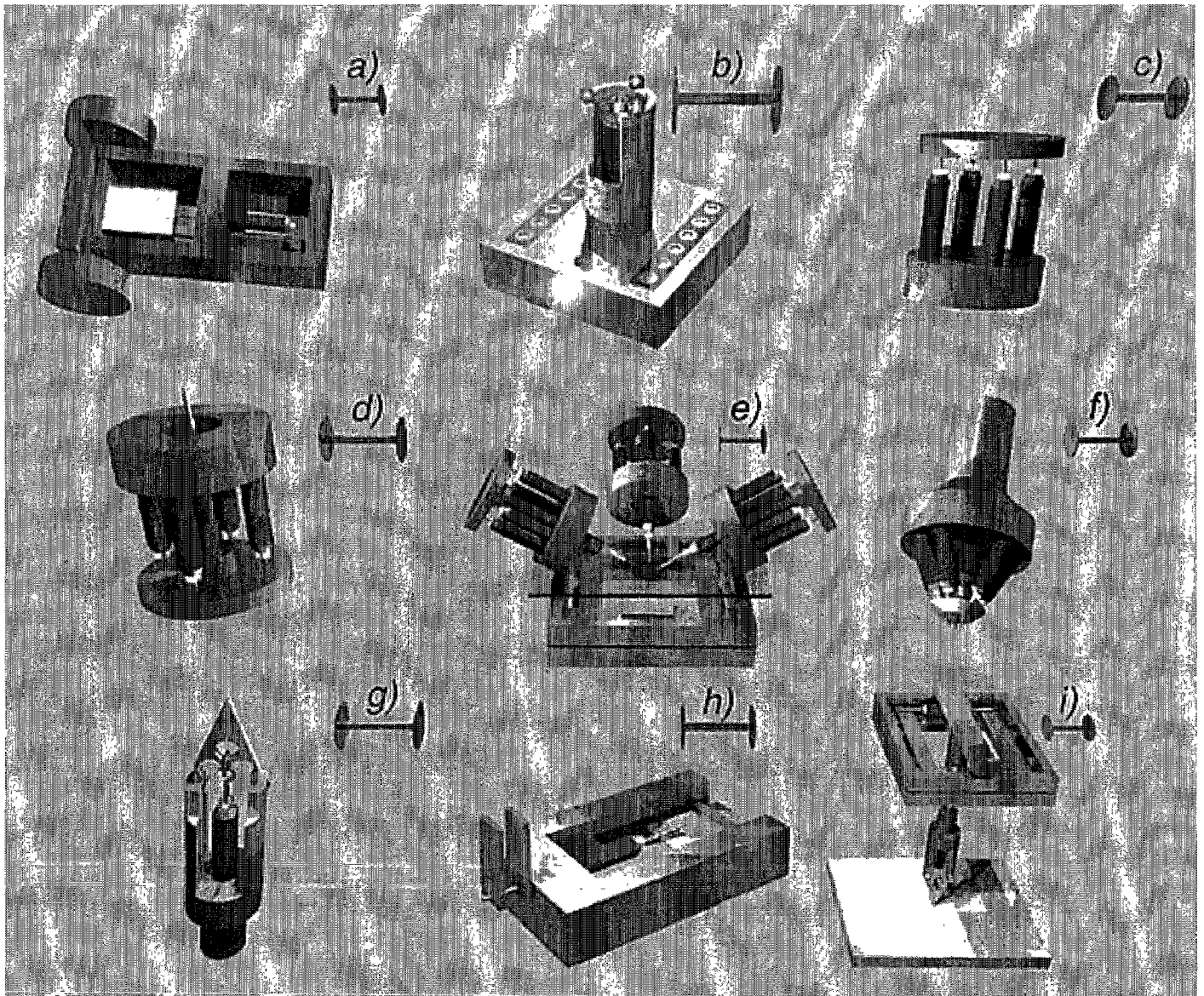
Positioneeretafel

De positioneeretafel in figuur 5 wordt door twee parallel geplaatste nanomotoren aangedreven. Bij combinatie van twee van deze tafels ontstaat een xy-tafel met een bereik van 5×5 mm en een resolutie in het nanometergebied. Door de afwezigheid van omkeerspel is deze xy-tafel ook geschikt voor het maken van beeldopnamen door middel van een raster-scan.



Figuur 6

Diagrama-positioneereenheid ten behoeve van de rasterelektronenmicroscopie



Figuur 7

Toepassingsvoorbeelden van positionersystemen op basis van nanomotoren. De maatbalkjes onder de letters van de figuren komen overeen met een lengte van 10 mm

a) foliepositionersysteem voor het afstemmen van de frequentie in golfpijpen,
 b) de kleinste commercieel verkrijgbare rastertunnelmicroscop,
 c) een kanteltafel, bijvoorbeeld voor het justeren van een spiegel,
 d) een nanomanipulator met een bereik van $1 \times 1 \times 5$ mm,

e) een werkbank bestaande uit drie nanomanipulatoren en een xy-tafel,
 f) een naaldmanipulator voor het aanprikken en grijpen van monsters,
 g) een vlakke grijper met 0,5 mm slag en nanometer-precisie,
 h) een parallelgrijper,
 i) een micromontagestation met drie assen en een grijper met een minimaal ruimteslag

Diafragma positionersysteem

Wanneer twee parallel geplaatste nanomotoren met een elastisch folie verbonden worden, dan kan zelfs in twee richtingen gepositioneerd worden, zoals uit figuur 6 blijkt. Gelijkloop van de motoren veroorzaakt een translatie en ongelijke loop een rotatie. Deze constructie is toegepast voor de houder van drie elektronendiafragma's die naar keuze in de elektronenstraal van een rasterelektronenmicroscop geplaatst worden.

Kanteltafel

Wanneer een plaat met buigslappe staven aan vier nanomotoren bevestigd wordt, dan kan de plaat gekanteld worden wanneer twee tegenover elkaar gelegen motoren zich tegengesteld bewegen. De andere twee motoren bepalen dan de rotatie-as, zie figuur 7c.

Nanomanipulator

Met een extra motor in het centrum ontstaat een 3D-

manipulator met sub-nanometer precisie zonder omkeerspel. De kanteltafel zorgt voor de xy-beweging van de sensor of gereedschap en de centrale nanomotor verzorgt geheel onafhankelijk de positionering in de z-richting over een lengte van 5 mm, zie figuur 7d. De thermisch gecompenseerde extreem compacte opbouw maakt het mogelijk dit systeem als rasterscannende sensor toe te passen.

Biofysische werkbank

Figuur 7e is een voorbeeld van een biofysische werkbank. De nanometermanipulator zou uitgerust kunnen worden met de volgende elementen.

- een getrokken glasbuis-canule voor de toe- en afvoer van materiaal,
- een elektrode voor het aanprikken en bewerken met elektrische stroom,
- een glasvezel voor analyse zoals fluorescentie-spectroscopie.

Elke sensor/actuator kan over tenminste 5 mm teruggetrokken worden. De doorlaat in de xy-tafel geeft daarvoor een optimale mogelijkheid. De positieernaauwkeurigheid voor de gehele opbouw ligt rond 10 nm maar is afhankelijk van de optredende trillingen.

Meetopstelling

Wanneer de nanomotoren voorzien zijn van elektroden of sensoren, dan toont figuur 7e een oplossing voor een meervoudige contactelektrode voor het testen in de halgeleidertechniek. De naaldmanipulator van figuur 7f

geeft een meer compacte oplossing voor het aanprikken met meervoudige elektrodes.

Grijper

Als grijper voor toepassingen in de microsysteemtechniek is een aantal oplossingen mogelijk. Door het aanbrengen van een slangetje door het inwendige van de nanomotor wordt een 'vacuumgrijper' gerealiseerd, evenzo kan met alcoholdruppels een 'vloeistofgrijper' worden gemaakt. Figuur 7g toont een mechanische grijper met een slag tot 0,5 mm en nanometer nauwkeurige precisie. Figuur 7h laat aan de linkerzijde twee kleine grijperbekken zien, waarmee een parallelgrijper is gemaakt. Gecombineerd met een xy-tafel toont figuur 7 een micromontage station van zeer geringe afmetingen en nanometerprecisie.

Aansturing van de nanomotor

Voor de aansturing van de nanomotoren zijn drie mogelijkheden gerealiseerd: als passieve sturing door een PC-insteekkaart, als actieve regelektronica en als hoogspanningsversterkers voor extreme toepassingen.

Noot

Dr. Volker Klocke (1962) is fysisus en promoveerde op het gebied van nano-oppervlaktelagen. Gelijkijdig werkte hij vijf jaar in de computertechniek. Begin 1994 richtte hij samen met Stephan Kleindiek de firma Volker Klocke & Stephan Kleindiek Nanotechnologie GbR te Aken (D) op. Dit artikel is een vertaling vanuit het Duits dat gepubliceerd is in *Feinmechanik und Messtechnik* 4/1996. Voor nadere informatie: Micro*Montage, Postbus 3108, 3760 DC Soest, telefoon 035-602 6400, fax 035-602 7200.

Technische gegevens van de nanomotor

Principe	integratie van een lineaire op massa traagheid gebaseerde aandrijving in een piezoactuator	
Aandrijving	positioneerbereik snelheid grovestap fijnpositionering resolutie	5 mm tot mm/s < 100 nm enige 100 nm, afhankelijk van de spanning met piezoprecisie, gekalibreerd beter dan 0,01 nm
Belastbaarheid	in bewegingsrichting loodrecht daarop	circa 30 mN (3 gram) circa 500 mN (50 gram)
Afmetingen	standaardversie	15 mm lang, 3,5 mm diameter
Door de motor te leiden objecten	glasvezel, slang, draad, etc. met een diameter van 0,5 mm	
Bedrijfsspanning	standaard hoogspanning	$\pm 15V$ bipolar en symmetrisch $\pm 150V$ voor speciale toepassingen
Stuurelektronica	passief geregeld versterkt	pc-kaart tot vier assen rasterlektronica en regelkring hoogspanningsversterker $\pm 150V$