

Mikromekanik

Jesper Bay

Mikromekanik er et område i rivende udvikling og Danmark er i kraft af forskningen på Mikroelektronik Centret (MIC) og i den danske industri med i front. Denne nye teknologi åbner spændende muligheder for fremstilling af transducere og små mekaniske strukturer, og der er blevet præsenteret et væld af fascinerende komponenter som f.eks. mikromotorer og pumper. De mikromekaniske komponenter bruges til videnskabelige eksperimenter eller masseproduceres som forbrugsvarer til lavpris.

I denne artikel gives en generel introduktion til mikromekanik med nogle af projekterne på Mikroelektronik Centret som eksempler. Mere detaljeret beskrives arbejdet med at udvikle en mikromekanisk mikrofon til høreapparater på Microtronic A/S.

De første mikromekaniske komponenter blev lavet for mere end 30 år siden som en videreudvikling af den højt udviklede teknologi til fremstilling af mikroelektronik (IC'er, "chips") på skiver af enkrySTALLINSK silicium (wafere). Med små modifikationer var det muligt at fremstille mekaniske komponenter med de kendte IC-fremstillingsprocesser. Siden er der sket en voldsom udvikling inden for mikroelektronikkens fremstillingsprocesser, som direkte har kunnet overføres til mikromekanikken. Desuden er der tilføjet en række specielle processer, der gør mikromekanikken meget fleksibel.

Hvad er fordelene ved mikromekanik?

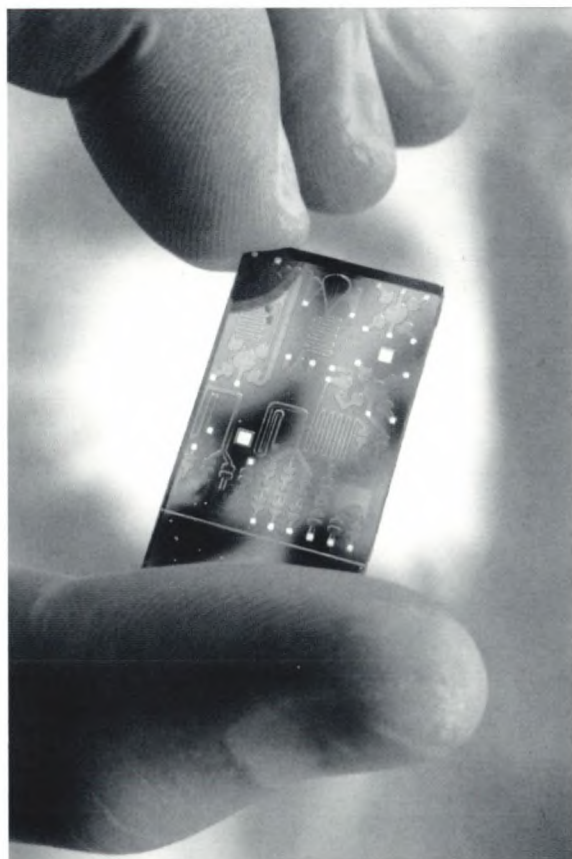
Mikromekanikken giver, som navnet siger, mulighed for at lave meget mindre strukturer med meget større præcision end traditionelle fremstillingsmetoder. De fleste dimensioner har typisk tolerancer bedre end $1\text{ }\mu\text{m}$ og tykkelsen af deponerede lag kan normalt kontrolleres langt bedre. Ikke desto mindre er der mange eksempler på mikromekaniske komponenter, der er adskillige centimeter store, og det skyldes, at det ikke kun er muligheden for at lave meget små strukturer, der er en fordel ved mikromekanikken.

Ud over, at fremstillingsprocesserne er meget raffinerede, er det enkrySTALLINSKE silicium, der bruges til IC-fremstilling og mikromekanik, et materiale med fremragende mekaniske egenskaber. Det har et højt elasticitetsmodul (dvs. det er meget stift), er stærkere end stål, lettere end aluminium og deformeres ikke plastisk.

Mikromekanik giver mulighed for fremstilling af både sensorer og aktuatorer med mange forskellige transducermekanismer, de kan f.eks. være piezoelektriske, piezoresistive, kapacitive/elektrostatisk, optiske og termiske. Det betyder, at der er stor mulighed for, at man kan vælge det optimale transducerprincip og -design.

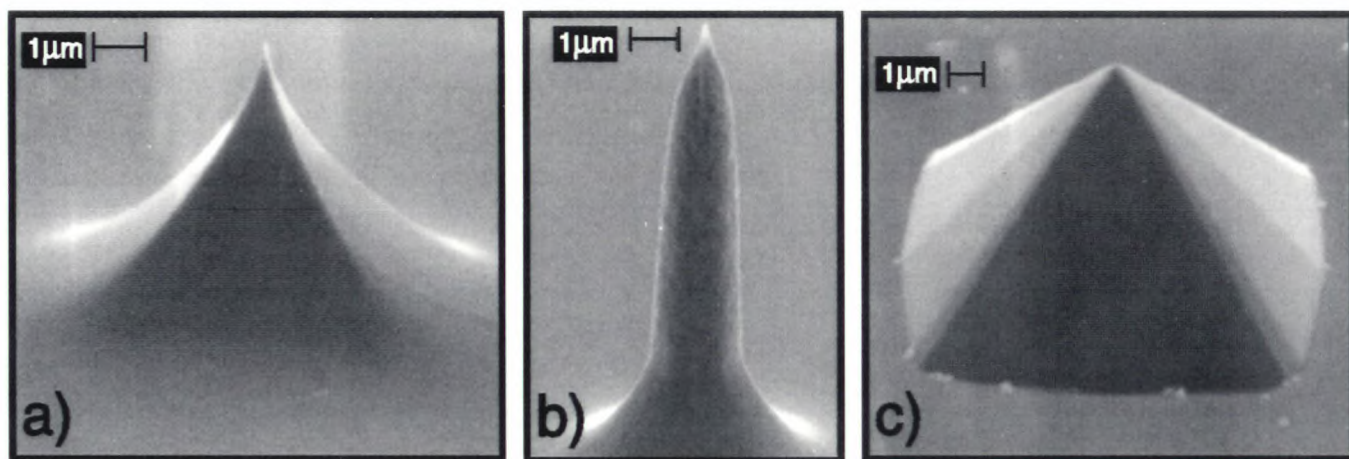
Det er muligt at integrere mange forskellige funktioner på samme chip, og man kan på den måde lave

avancerede systemer. Samtidig gør fremstillingsteknologien det simpelt at integrere elektronik. Enten kan elektronik og mikromekanik integreres på samme chip, eller også kan separate chips kombineres i multichip-moduler. Figur 1 viser et system beregnet til væskehåndtering og -analyse, som Danfoss arbejder på at udvikle. I et sådant mikrosystem kan man integrere bl.a. pumper og ventiler, filtre, blandere, reaktionskamre og forskellige sensorer til f.eks. kemisk analyse.



Figur 1. Et eksempel på et mikrosystem til væskehåndtering og -analyse under udvikling af Danfoss.

Den væsentligste årsag til industriens interesse for mikromekanik er dog nok batch-fremstillingen, hvor mange komponenter bearbejdes i én arbejdsgang. Batch-fremstillingen er arvet fra IC-fremstillingen, og den er en afgørende årsag til den meget lave pris på selv meget komplicerede integrerede kredsløb. Både elektroniske og mikromekaniske chips er meget små i forhold til størrelsen af siliciumskiverne, som de laves på. Der er derfor plads til mange på en skive, og fordi alle komponenter på en skive bearbejdes i én arbejdsgang, bliver produktionsomkostningerne reduceret væsentligt.



Figur 2. Spidser til atomic force mikroskoper lavet med forskellige ætseprocesser: a) Isotrop ætsning med en firkantet maske. b) Kombineret anisotrop og isotrop ætsning med en rund maske. c) Ætsning i KOH, som giver en spids defineret af krystallografiske planer.

Der er naturligvis også en række ulemper ved mikromekanik. Væsentligt er det, at det kræver et meget kostbart udstyr at fremstille. Derfor er det meget almindeligt, at virksomheder udvikler mikromekaniske produkter i samarbejde med universiteter, der har udstyret til rådighed.

I den senere tid er der dog flere og flere producenter af integrerede kredsløb, der også tilbyder at lave mikromekanik, oven i købet integreret med elektronik på samme chip.

Mikromekanikkens processer

De vigtigste processer er fotolitografi og forskellige deponerings- og ætseprocesser. Mange af processerne er de samme, som bruges til mikroelektronik, men især inden for ætsning og waferbonding (forklares senere) er der udviklet specielle processer, som kun bruges i mikromekanik.

Fotolitografien er den vigtigste proces, fordi den gør det muligt at definere de meget fine strukturer. En fotofølsom film ("fotoresist"), der er lagt på siliciumskiven, eksponeres gennem en glasmaske med det ønskede mønster, og efter fremkaldelse er der mønster i fotoresisten. Mønsteret overføres til en mekanisk struktur i/på siliciumskiven ved en efterfølgende ætsning, der kun angriber der, hvor skiven ikke er beskyttet af masken (fotoresisten). Mønsteret kan også overføres ved forskellige deponeringsteknikker, der kun efterlader materiale der, hvor siliciumoverfladen ikke er dækket af fotoresist.

I nogle tilfælde kan man ikke direkte bruge fotoresisten som beskyttelse ved ætsning, f.eks. hvis den angribes for meget af ætsemidlet. Man kan da bruge et hjælpelag, som mønsteret i fotoresisten overføres til ved en mildere ætsning. Derefter bruges mønsteret i hjælpelaget i stedet for fotoresisten til beskyttelse under den egentlige ætsning. Fotoresisten og eventuelle hjælpelag fjernes naturligvis tilsidst.

Deponerede tyndfilm er tynde lag af et materiale (tyndfilm) der er deponeret på siliciumskiven. De bruges i mikroelektronikken til at give elektrisk isolation, til ledningsforbindelser og til beskyttelse af overfladen. I mikromekanik bruger man også i høj grad deponerede tyndfilm, men af mange flere forskellige materialer såsom silicium, SiO_2 , SiC , Si_3N_4 , metaller, glasser og polymerer. Desuden anvendes aktive materialer som f.eks. piezoelektriske keramikker. De deponerede lag er normalt fra nogle få hundrede Å og op til mere end 10 μm tykke, og lige som silicium-grundmaterialet kan de bruges som mikromekaniske konstruktionsmaterialer.

Ætsning bruges til at lave struktur i materialerne eller til at fjerne materialer, der kun har haft en midlertidig funktion. Mest anvendt er traditionel våd kemisk ætsning og tør ætsning som plasmaætsning og reaktiv ion ætsning (RIE). Væsentligt for alle ætseprocesserne er, at de skal fjerne ét materiale selektivt uden at angribe de øvrige materialer på siliciumskiven for meget. Både de våd-kemiske ætseprocesser og RIE kan være såvel isotrope som anisotrope.

En isotrop ætseproces ætser lige hurtigt i alle retninger, og der bliver derfor ætset vandret ind under masken. I tværsnit bliver denne underætsning af form som en kvartcirkel med centrum på kanten af masken.

Anisotrope ætseprocesser kan f.eks. følge bestemte krystallografiske planer i den enkrystallinske siliciumskive eller ætse lodret ned i materialet sådan, at masken ikke bliver underætset.

Et godt eksempel på, hvordan egenskaberne ved forskellige ætseprocesser kan udnyttes, er fremstillingen af prober til atomic force mikroskoper (AFM), som Anja Boisen fra DME A/S arbejder med i sit erhvervsforskerprojekt. Spidsen, som prøven scannes med i et AFM er meget afgørende. Den skal være meget skarp for at give et billede med høj opløsning, og spidsens facon er også meget væsentlig. Alt efter anvendelsen kan man være in-

teresseret i en meget slank spids, der kan komme ned i dybe strukturer, eller en mere robust spids, til hurtige scan eller scan af overflader med stor ruhed. Med mikromekanik kan man lave skarpe spidser med mange forskellige former, og man kan desuden samtidig integrere dem på en mikrobjælke som passer direkte til mikroskopet.

Figur 2 a) viser en spids, der er lavet ved at ætse siliciumskiven med en isotrop æts. En lille rund eller kvadratisk maske fremstillet med fotolitografi beskytter overfladen mod ætsningen der, hvor spidsen skal være. Ætsningen går ind under masken fra alle sider og ender til sidst i et punkt, når masken er helt underætsset. Masken falder så af og efterlader en spids på siliciumoverfladen.

Spidsen i figur 2 b) er lavet med en kombination af først en isotrop ætsning næsten hele vejen ind under masken derefter en lodret anisotropisk ætsning og til sidst endnu en isotrop ætsning resten af vejen ind under masken.

Spidsen i figur 2 c) er ætset i en KOH-opløsning, som ætser silicium anisotropt. Ætsehastigheden er afhængig af, hvilket krystallografisk plan der ætses, og forskellen mellem ætsehastigheden af den hurtigste og den langsomst ætsende plan er i størrelsesordenen 1000 gange. På grund af ætsehastighedens krystallografiske afhængighed kan man få en meget veldefineret pyramideformet spids, som kan gøre det lettere at fortolke AFM-billederne og samtidig er meget robust.

KOH-opløsninger anvendes meget til mikromekanik pga. den krystallografiske anisotropi og muligheden for at lave såkaldte ætsestop. Den væsentligste egenskab ved den krystallografiske anisotropi er, at ætsehastigheden for de krystallografiske $\{111\}$ -planer er praktisk talt nul. Alt efter siliciumskivens krystallografiske orientering kan dette udnyttes til ætsning af en lang række forskellige strukturer.

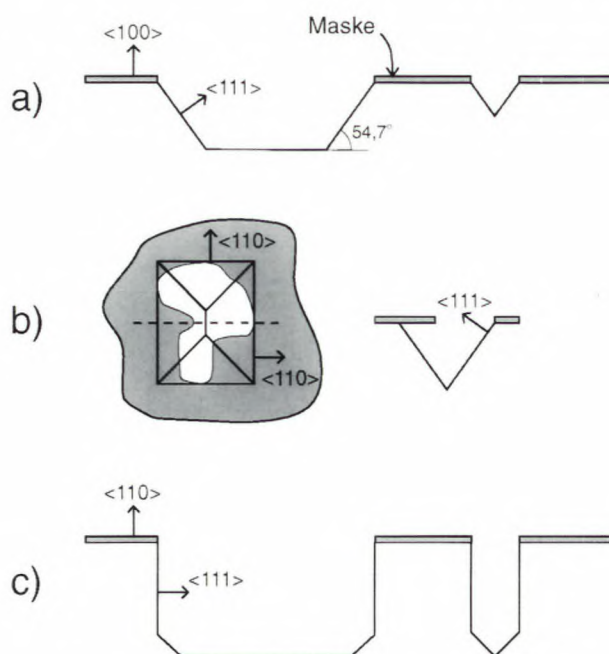
Mest benyttet er $\langle 100 \rangle$ -orienterede skiver, hvor $\{111\}$ -planerne ligger i en vinkel på $54,7^\circ$ med overfladen, se figur 3 a). ($\langle 100 \rangle$ er den krystallografiske betegnelse for en retning parallel med en af kanterne på den krystallografiske enhedskube).

$\{111\}$ -planernes skæringer med $\{100\}$ -planerne ligger vinkelret på hinanden i $\{100\}$ -planerne (dvs. også i skivens overflade). Det betyder, at hvis man ætser med KOH ned i en $\{100\}$ -overflade gennem en åbning i en maske, stopper ætsningen, når den når $\{111\}$ -planerne (figur 3 b)). På grund af $\{111\}$ -planernes indbyrdes placering, vil man, hvis man ætser længe nok, ende med et rektangulært pyramideformet hul, uanset hvad form åbningen i masken har. Hullet er defineret ved, at åbningen i masken netop er indskrevet i pyramidens grundflade.

I en $\{110\}$ -orienteret siliciumskive ligger $\{111\}$ -planerne vinkelret på overfladen, og man kan derfor ætse fuldstændig lodret ned i skiven (figur 3 c)). Dette er udnyttet i accelerometret vist i figur 4, som Torben Storgaard-Larsen fra Brüel & Kjær har udviklet i sit erhvervsforskerprojekt. Som det ses på billedet, bliver de resulterende strukturer rhombiske pga. $\{111\}$ -planernes indbyrdes orientering.

En vigtig anvendelse af KOH er fremstilling af mem-

braner ved at ætse igennem siliciumskiverne. Man kan ganske enkelt ætse ned i siliciumskiven indtil den ønskede tykkelse er nået, men dette kan kun gøres med relativt tykke membraner – typisk $10\ \mu\text{m}$ – pga. variationer i skivens tykkelse og problemer med at stoppe ætsningen på det rette tidspunkt.



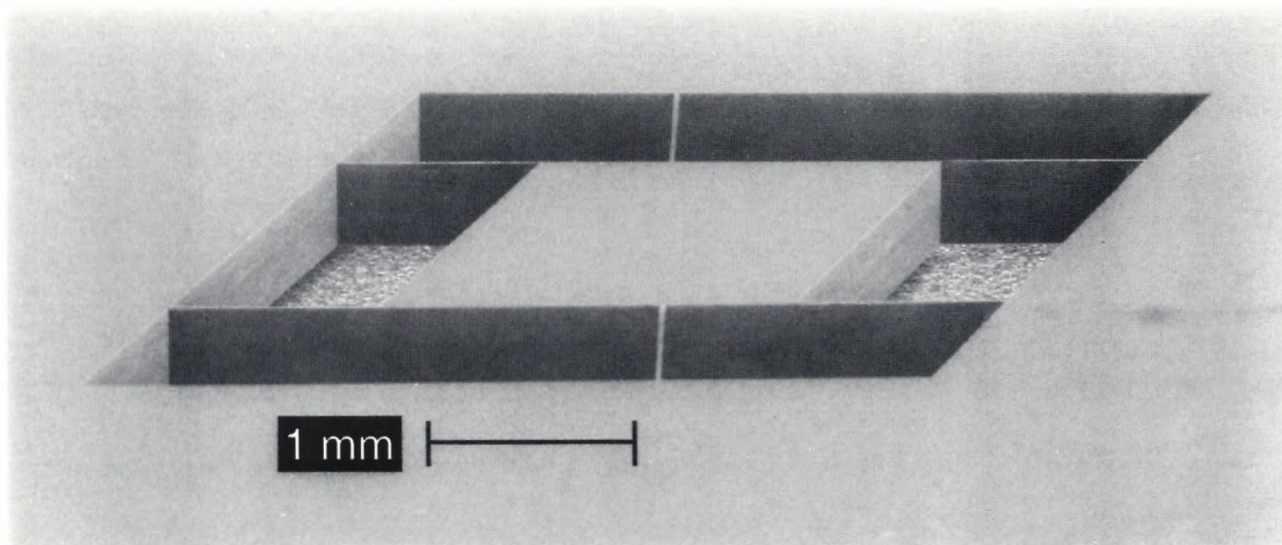
Figur 3. Ætsning med KOH: a) ætsning i en $\langle 100 \rangle$ -orienteret wafer, b) ætsning i en $\langle 100 \rangle$ -orienteret wafer igennem en uregelmæssig åbning i masken, og til højre et tværsnit af det resulterende rektangulære pyramideformede hul, c) ætsning i en $\langle 110 \rangle$ -orienteret wafer.

Tyndere membraner kan laves meget velkontrolleret ved forskellige ætsestop-teknikker. Man kan f.eks. dotere den ene side af siliciumskiven med en høj koncentration af bor i den tykkelse som membranen skal have og udnytte, at KOH ætser udoteret silicium meget hurtigere end silicium med en høj borkoncentration. Man ætser så fra den anden side af skiven og ætsningen stopper automatisk når det bordoterede lag nås. Med denne teknik kan man ætse igennem en $500\ \mu\text{m}$ tyk siliciumskive og stoppe når et $1\ \mu\text{m}$ tykt bordoteret lag er tilbage.

En endnu bedre standsning af ætsningen opnås ved at påtrykke en potentialforskelle mellem æteopløsningen og siliciumskiven. Ætsningen går så i stå ved overgangen fra p- til n-type doteret silicium. Man kan også ætse hele vejen igennem siliciumskiven ned til et lag, der ikke angribes af KOH som f.eks. Si_3N_4 , der er deponeret på den anden side af skiven, og som så bliver en fri membran.

Ved at dotere i et ønsket mønster eller ved efterfølgende at ætse et mønster i membranen, kan man lave f.eks. bjælker og dyser.

Waferbonding: Det kan lade sig gøre at lave meget komplicerede strukturer i en siliciumskive, men fleksibiliteten bliver meget større, hvis funktionerne deles over to eller flere skiver. Det kræver, at man kan samle (bonde) to skiver og evt. lave elektriske forbindelser mellem dem.



Figur 4. Accelerometer lavet med KOH-ætsning i $\langle 110 \rangle$ -silicium. Udlæsning sker optisk vha. den integrerede optiske bølgeleder midt i billedet.

Den første bondeproces (Udtales med tryk på -de, *red.*) der blev udviklet, var elektrostatiske bonding af en siliciumskive og en glasskive. Det er nemlig meget simpelt at lave en overordentlig stærk binding mellem en glasskive og en siliciumskive (eller en anden leder). Skiverne anbringes oven på hinanden og opvarmes. Herefter påtrykkes der en stor spændingsforskel mellem siliciumskiven og underlaget, som glasskiven ligger på, hvorved de to skiver bondes sammen. Dette er udnyttet i mikrosystemet i figur 1, hvor væskekanalerne er ætset ned i en glasplade, og de aktive strukturer som ventiler og pumper hovedsageligt ligger i siliciumskiven.

De mange forskellige processer kan kombineres på utallige måder. Man skelner grundlæggende mellem "**surface micromachining**" og "**bulk micromachining**".

Ved surface micromachining ("overflade-mikromekanik") bruges siliciumskiven som bærende substrat, og de ønskede strukturer opbygges af lag, der deponeres oven på skiven. Meget anvendt i surface micromachining er såkaldte offerlag, som bruges, hvor der skal være "luft" under en struktur, der opbygges på silicium skiven. Da det ikke er muligt at deponere et materiale frit svævende over skiven, deponeres først et passende offerlag med en tykkelse svarende til den ønskede luftspalte. Derefter deponeres og ætzes den "frit svævende" struktur og til sidst fjernes offerlaget så strukturen frigøres.

I bulk micromachining ("substrat-mikromekanik") laves mikromekaniske strukturer ved at man arbejder sig ned i siliciumskiven og fjerner materiale sådan, at den ønskede struktur bliver tilbage. Et eksempel på bulk micromachining er accelerometeret i figur 4.

Man bruger ofte en kombination af de to teknikker. Komponenten i figur 5 er lavet ved, at der i et deponeret SiO_2 -lag er ætset et mønster. Derefter er SiO_2 -

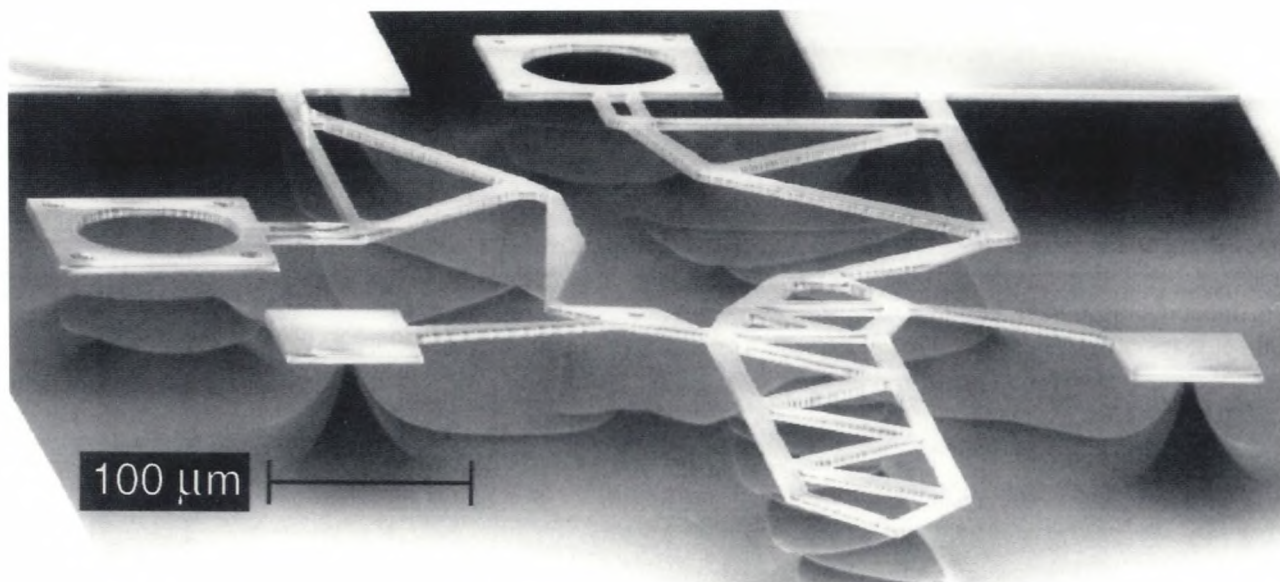
strukturene frigjort ved at ætse det underliggende siliciumsubstrat isotropt hele vejen ind under dem undtagen i en række punkter, hvor de skal være forankret.

Indkapsling

De fleste mikromekaniske komponenter kræver en form for indpakning for at beskytte dem mod det omgivende miljø og gøre dem mere robuste. Indtil nu har man næsten altid lavet indkapslingen med traditionel teknologi på chipniveau, og man har altså ikke kunnet udnytte batch-fremstillingens fordele. Derfor har indkapslingen ofte været ti gange dyrere end fremstillingen af selve den mikromekaniske chip.

Det kan godt lade sig gøre at lave en mikromekanisk chip, der er beskyttet. F.eks. kan flere skiver bondes sammen mod hinanden sådan, at de følsomme strukturer kommer til at ligge indkapslet imellem skiverne. Nogle komponenter laves på denne måde med en siliciumskive og en eller to glasskiver, men de kræver stadig en ekstra indpakning. Det skyldes dels, at de ikke har elektronik integreret, og dels, at den elektriske forbindelse til omverdenen sker med wirebonding, hvor det normalt er krævet, at man kan bruge lodning. Derfor ser man mange komponenter, hvor en mikromekanisk chip og en elektronisk chip er anbragt ved siden af hinanden i en pakning svarende til dem, der bruges til almindelige IC'er. De to chips er så forbundet med hinanden og med pakningens loddeterminaler ved brug af wirebonding.

For at bringe prisen ned er det altså meget vigtigt at lave indkapsling og elektriske forbindelser på wafer-niveau. Det er bare et spørgsmål om tid, før de første komponenter med elektronik og indkapsling integreret på wafer-niveau er en realitet.



Figur 5. En mikrostruktur, der kan samle og invertere bevægelser langs to akser, lavet i et deponeret SiO₂-lag.

Mikromekanisk mikrofon til høreapparater

Microtronic A/S er et af de firmaer i Danmark, der ser nye muligheder i at anvende mikromekanik. Microtronic laver komponenter til høreapparater, bl.a. mikrofoner. Mikrofonerne, der bruges i høreapparater i dag er fremstillet med stort set den samme teknologi, som man brugte i 60'erne, og det er yderst begrænset, hvad der kan opnås ved yderligere optimering. Der er ønsker om mindre mikrofoner med øget pålidelighed, større båndbredde, bedre signal/støj-forhold og lavere fremstillingspris. For at kunne opnå dette, er det nødvendigt med en radikal ændring af mikrofonen.

Mikromekanik ser ud som en lovende teknologi. Der er bl.a. en række universiteter, der har publiceret lovende resultater med mikromekaniske mikrofoner. Derfor valgte man at starte et projekt til udvikling af en mikromekanisk mikrofon.

Mikrofonerne, der bruges i høreapparater i dag, er kondensatormikrofoner. De består af en blød membran, som sammen med en fast bagelektrode udgør en pladekondensator. Membranen udbøjes af lydtrykket, det giver en ændring i luftgabet i kondensatoren og dermed ændres den elektriske kapacitet, som derfor kan bruges som mål for lydtrykket.

Sammenlignet med den traditionelle teknologi giver mikromekanik f.eks. mulighed for at lave tyndere membraner og meget mindre luftgab mellem membran og bagelektrode, og begge dele kan være med til at øge følsomheden. Det giver imidlertid også nye problemer, fordi det meget mindre luftgab gør mikrofonen meget følsom over for støv og kondensdannelse.

For at undgå, at man bare overførte det eksisterende mikrofondesign til den nye teknologi, valgte vi først at lave en sammenlignende undersøgelse af alle tænkelige transducerprincipper for at kunne vælge den bedst eg-

nede. Blandt de mange undersøgte transducerprincipper kan nævnes: piezoelektriske, piezoresistive, capacitive (almindelige og med et ladet "elektret"), optiske og MOS (hvor membranen er gate i en MOS-transistor). Desuden blev tunnelstrømsdetektion undersøgt. Det er et nyt interessant transducerprincip, der er baseret på strømmen, der kan tunneller mellem to ledere, der er meget tæt på hinanden. Strømmen afhænger eksponentielt af afstanden, og det giver en meget stor følsomhed. Tunnelstrømsdetektion har været anvendt i bl.a. mikromekaniske accelerometre.

Det viste sig sjovt nok, at i konkurrencen med de nye detektionsprincipper, er det klassiske princip stadig levedygtigt. Undersøgelserne pegede på capacitive mikrofoner som de bedste kandidater. For at undgå problemer med fugt og støv i luftgabet, blev der samtidig udviklet nogle helt nye mikrofondesign. Et af dem beskrives nærmere i de følgende afsnit.

Dobbeltmembran-mikrofonen

Problemet med fugt og støv i den smalle luftspalte kan løses ved at give mikrofonen to membraner, én på hver side af bagelektroden (se figur 6). De giver en fuldstændig hermetisk forsegling af de små luftgab mellem bagelektroden og membranerne, så støv og fugt ikke kan blive et problem.

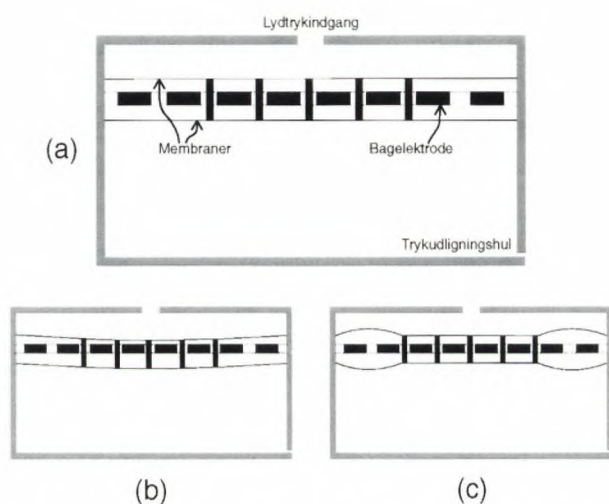
Nu kunne man spørge hvorfor man ikke blot holder sig til en enkelt membran og forsegler denne hermetisk henover luftgabet ned til bagelektroden? Sagen er at membranen ikke alene skal reagere villigt på lydtrykket, men også skal være immun overfor ændringer i barometerstanden. Dette statiske tryk varierer omkring 1000 gange mere end det største lydtryk som mikrofonen skal måle.

Ændringer i det statiske tryk vil få membranen i en enkeltmembrankonstruktion til at udbøje vold-

somt, hvilket fuldstændig ødelægger mikrofonens funktion. Membranerne i en dobbeltmembranmikrofon vil naturligvis også give sig under ændringer i det statiske tryk, men her muliggør mikromekanikken en smart konstruktion der løser problemet.

Løsningen består i at forbinde de to membraner med søjler, der går igennem huller i bagelektroden som vist på figur 6. I de yderste områder er der ingen søjler, og i disse områder optages ændringer i det statiske tryk ved at de udbøjer. Der er ikke elektroder i de yderste områder, så udbøjningerne påvirker ikke lydtryksmålingen. Denne konstruktion er formentlig kun mulig med mikromekanik.

Det er meget vanskeligt at lave analytiske beregninger på dobbeltmembran-mikrofonen med søjlerne, så for at sikre at dens akustiske følsomhed ikke bliver for lav, modellerede vi strukturen med finite-element-beregningsprogrammet "ANSYS". Resultatet viste, at dobbeltmembran-mikrofonen vil kunne opfylde kravene til høj følsomhed over for lydtryk og lille følsomhed over for ændringer i det statiske tryk.



Figur 6. Dobbeltmembran-mikrofon: membraner, bagelektrode og hus vist skematisk; (a) uden trykpåvirkning (b) med lydtryk (c) med statisk trykpåvirkning.

Force-balancing

Der er naturligvis grænser for hvor meget membranen i en mikrofon kan flytte sig. Udsat for for store lydtryk vil membranen ødelægges eller komme i kontakt med bagelektroden. Men længe inden det sker betyder deformationerne af membranen at den bliver ulineær i sit respons på lydtrykket. En større mekanisk stivhed af membranen øger de største lydtryk man kan måle, men hæver samtidigt grænsen for hvor lave lydtryk man får med. Kort sagt bliver mikrofonen mindre følsom, mens dynamikområdet bevares.

For at øge dynamikområdet kan man anvende en

teknik der er kaldt "force balancing". Force-balancing har med succes været anvendt i mikromekaniske accelerometer, og der er også et enkelt eksempel på en mikromekanisk mikrofon med force-balancing. Princippet i force-balancing er meget simpelt: Man påvirker sensoren med et signal, der modvirker og ideelt set ophæver det signal, den måler. For mikrofoner gøres det ved, at membranen elektrostatiske påvirkes af en kraft, der ophæver lydtrykket. I stedet for det direkte mikrofonsignal bruger man så den styrespænding som man påtrykker mikrofonen som mikrofonudgangssignal.

Med denne teknik opnår man, at membranens udbøjning bliver reduceret og den tilsyneladende stivhed bliver større. Det kan give en række fordele som øget følsomhed, båndbredde og dynamikområde, bedre linearitet og mindsket følsomhed for variationer i det statiske tryk og for variationer i stivheden af membraner. Desuden giver det mulighed for elektronisk at tilpasse overføringsfunktionen, f.eks. kan resonansfrekvensen og dæmpningen af resonansen kontrolleres. Ulemper ved at bruge force-balancing er det mere komplicerede elektroniske kredsløb til aftastning af sensoren og risikoen for at mikrofonen går i selvsving.

Fremstilling af mikrofonen

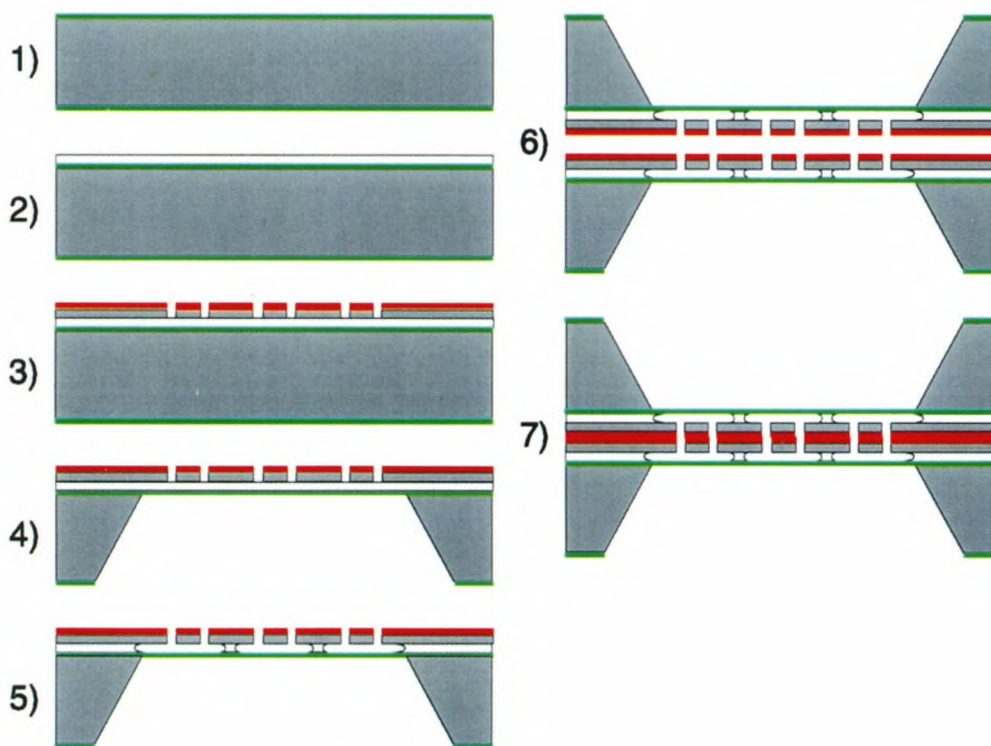
Dobbeltmembran-mikrofonen ville være meget vanskelig at fremstille med traditionel teknologi, men med mikromekanik er det muligt. Figur 7 viser et forslag til en fremstillingsproces, som meget ligner tidligere anvendte metoder til fremstilling af mikromekaniske mikrofoner – bortset fra det sidste processtrin.

Første trin i fremstillingen er deponering af et ca. $0,2\ \mu\text{m}$ tykt lag Si_3N_4 på siliciumskiven. Det skal senere udgøre mikrofonmembranen. Derefter deponeres et lag SiO_2 med en tykkelse i størrelsesordenen $1\ \mu\text{m}$, som kommer til at definere luftgabet mellem membran og bagelektrode. I trin 3) deponeres et siliciumlag og et lag, der senere skal bruges til waferbonding, og der ætzes mønster i de to lag. I trin 4) ætzes der en åbning i nitriden på bagsiden, og derefter ætzes der hele vejen igennem skiven med KOH. I trin 5) ætzes SiO_2 'en mellem membranen og bagelektroden væk. I enkelte punkter bliver SiO_2 'en tilbage, hvor små arealer af bagelektroden tidligere er blevet ætset fri fra resten af bagelektroden. De kommer senere til at udgøre søjlerne.

Da Si_3N_4 -membranen ikke er ledende, skal der pådampes et tyndt metallag på den – det er ikke vist i figur 7. Som mikrofonen ser ud på dette stadium ligner den meget de traditionelle kapacitive mikromekaniske mikrofoner, der tidligere er blevet publiceret.

To identiske wafere bondes nu sammen forside mod forside – trin 7) – sådan, at de tilsammen udgør strukturen med to membraner der hermetisk forseglar en bagelektrode mellem dem. De små arealer af bagelektrodematerialerne, som kun hænger fast i membranen, danner nu søjlerne mellem de to membraner.

■ Silicium ■ Si_3N_4 □ SiO_2 ■ Bondmateriale



Figur 7. En fremstillingsproces til dobbeltmembran-mikrofonen.

Den færdige mikrofon

Det forventes, at de første mikrofoner lavet i Mikroelektronik Centrets laboratorier er færdige i begyndelsen af 1996. Men derfra er der stadig langt til en færdig mikrofon, der kan bruges i et høreapparat. Selvfølgelig skal designet optimeres yderligere for at forbedre signalet og mindske støjen så signal/støj-forholdet bliver bedre. Vigtigere endnu er det, at der også skal integreres elektronik i form af filtre og forstærkere, og at der skal laves en indkapsling af mikrofonen. Indkapslingen af en mikrofon er vanskeligere end de fleste andre komponenter, fordi der skal være åbent ud til omgivelserne, så lydtrykket kan komme ind i mikrofonen. Det er målet at lave indkapslingen integreret på waferniveau i så høj grad som muligt.



Jesper Bay er civilingeniør og ansat i Microtronic A/S som erhvervsforskerstuderende på Mikroelektronik Centret.
E-mail: Bay@mic.dtu.dk