

Ontwerp van een MEMS-gebaseerde schakelmatrix
voor een geautomatiseerd distributiefame
in telecommunicatietoepassingen

Design of a MEMS-Based Switch Matrix
for an Automated Distribution Frame in Telecommunication Applications

Dries Dellaert

Promotor: prof. dr. ir. J. Doutrelouigne
Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van
Doctor in de Ingenieurswetenschappen: Elektrotechniek

Vakgroep Elektronica en Informatiesystemen
Voorzitter: prof. dr. ir. R. Van de Walle
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2015 - 2016



Samenvatting

In de laatste decennia is het internet zeer snel gegroeid. Niet alleen is het aantal geconnecteerde toestellen enorm toegenomen, ook de hoeveelheid digitale data is zeer sterk gegroeid. Om toegang te krijgen tot deze groeiende hoeveelheid data, zijn hogere bandbreedtes nodig. De ultieme breedband oplossing is waarschijnlijk een fiber-to-the-home netwerk. Echter, het installeren van een dergelijk netwerk vergt grote investeringen, die operatoren proberen te omzeilen door bestaande distributienetwerken, zoals het telefoonnetwerk of het kabeldistributienetwerk, te hergebruiken. In het geval van het telefoonnetwerk werden getwiste paren geïnstalleerd vanaf de telefooncentrale naar de straatkasten, en vanuit deze straatkasten naar de abonnees. In de telefooncentrale bevindt zich een hoofddistributiefame dat de verbinding van de getwiste paren naar de POTS apparatuur en DSLAMs mogelijk maakt. Gelijkaardig wordt er in een straatkast een kleiner distributiefame geïnstalleerd om de lijnen van de telefooncentrale te verbinden met de abonneelijnen. Vandaag de dag worden deze distributiefames in de meeste gevallen nog steeds handmatig geconfigureerd door het toevoegen van overbruggingsdraden. Dus iedere keer als een abonnee een nieuwe dienst aanvraagt of zijn dienst wil wijzigen, moet er een technicus worden uitgezonden naar de straatkast om handmatig overbruggingsdraden toe te voegen aan het distributiefame. Dit proces is vrij duur, tijdrovend en foutgevoelig. Daarbij komt nog dat door het uitrollen van snellere toegangstechnologieën zoals VDSL of G.fast, de kilometers lange getwiste paren niet genoeg bandbreedte meer hebben. Daarom implementeren operatoren een FTTN, FTTC of FTTdp netwerk, waarin DSLAMs worden geïnstalleerd in netwerk knooppunten, straatkasten of zelfs kleinere verdeelpunten om de lengte van de getwiste paren te verkorten. De DSLAMs zijn hierbij aan het kernnetwerk verbonden door middel van optische vezels. Deze verschuiving van de apparatuur dichterbij de abonnees, leidt tot meer (maar kleinere) distributiefames door het vertakken van het netwerk. Het uitzenden van een technicus naar deze kleinere, meer geografisch verspreide kasten verhoogt de operationele kosten nog meer. Om de kosten van deze handmatige tussenkomst aan geografisch verspreide straatkasten in een toenemend concurrerende telecommunicatie markt te verminderen, is een geautomatiseerde schakeloplossing nodig. In dit werk werd een MEMS gebaseerde schakelmatrix ontwikkeld die kan worden gebruikt in een geautomatiseerd distributiefame in straatkasten of DPUs.

Aangezien de MEMS gebaseerde schakelmatrix een handmatig geconfigureerd distributiefame moet vervangen, moet de functionaliteit hetzelfde zijn. Een belangrijke vereiste voor de schakeloplossing is bistabiliteit, zodat de geopende of gesloten toestand van de

schakelaar behouden blijft zonder toevoeging van energie. In het handmatig geconfigureerd distributiefraam blijven de verbindingen gemaakt door de overbruggingsdraden eveneens behouden. Deze bistabiele eigenschap werd geïmplementeerd met behulp van een mechanisch vergrendelingsmechanisme waarbij bistabiele toestanden werden verkregen door het sequentieel aansturen van twee thermische actuatoren.

Omdat de gegenereerde thermische expansie in de actuatoren zeer klein is, wordt er meestal een mechanisme geïmplementeerd dat de verplaatsing versterkt. Dit resulteert in de typische V-vormige actuatoren of actuatoren met twee warme armen, die relatief lang zijn. Indien deze actuatoren gebruikt worden in een vergrendelmechanisme, leidt dit tot een grote L-vormige schakelaar die niet zo praktisch is om compact te stapelen op een microchip. Om dit probleem op te lossen, werd een nieuw mechanisme ontwikkeld dat de contacten vastklemt in plaats van te vergrendelen. Hierbij kon de noodzakelijke verplaatsing van één van de contacten worden verminderd, waardoor het gebruik van een lineaire actuator mogelijk werd die grotere krachten kan uitoefenen. Het voordeel van dit mechanisme is dat de beide actuatoren van de schakelaar naast elkaar konden geplaatst worden, waardoor veel chipoppervlakte werd bespaard. Dit mechanisme ruilt twee middelmatige verplaatsingen in voor een kleinere en een grotere verplaatsing met als resultaat een meer compacte vorm en een verhoogde contactkracht. Het mechanisme werd succesvol gedemonstreerd maar werd niet verder ontwikkeld vanwege het lage productie rendement.

De V-vormige actuatoren, de actuatoren met twee warme armen en de lineaire actuatoren werden gefabriceerd in de MetalMUMPs technologie waarbij de structurele laag wordt vervaardigd door elektrodepositie van nikkel. Dit resulteerde in een lage aanstuur impedantie in de orde van 1Ω . Bij het aansturen van deze actuatoren met een stroom werd er vastgesteld dat de verplaatsing van de actuatoren moeilijk te controleren was. Dit werd veroorzaakt door de positieve weerstandstemperatuurcoëfficiënt waardoor de weerstand van het nikkel toeneemt en zodus meer vermogen wordt geleverd. Dit versterkend effect resulteerde in een sterke toename van de verplaatsing die moeilijk te controleren was. Een aansturing met een spanning was echter ook niet ideaal omdat de grote stroom een te grote spanningsval in de interconnecties met de actuatoren veroorzaakt.

Vanwege deze moeilijkheden met het controleren van de verplaatsing werd er een thermische actuator ontwikkeld met een polysilicium verwarmingselement. Deze actuator bestaat uit een warme en een koude arm, verankerd aan het substraat aan één uiteinde en verankerd aan elkaar aan het andere uiteinde met een siliciumnitride plaat. De warme arm werd verwarmd door een polysilicium verwarmingselement, gefabriceerd direct onder deze arm. Het elektrothermomechanisch gedrag van deze actuator werd geanalyseerd aan de hand van een 1-dimensionale modelering van de structuur. Uitgaande van de aangelegde stroom door het verwarmingselement, werden de temperatuurprofielen in de actuator berekend. Vervolgens werden deze temperaturen gebruikt om de thermische expansie en de uiteindelijke verplaatsing van de actuator te berekenen. Tijdens de analyse werden ook de spanning over het verwarmingselement en de mechanische spanning in de structuur berekend. De resultaten van de modellering kwamen goed overeen met de eindige-elementensimulatie, ondanks het feit dat de warmteoverdracht werd gemodelleerd met vormfactoren. De actuatoren werden gefabriceerd en de resultaten van de mo-

dellering en de eindige-elementenanalyse kwamen goed overeen met de meetresultaten. Het gebruik van het polysilicium verwarmingsselement vereenvoudigde de spanningsaansturing van de actuator en resulteerde in een betere controle van de verplaatsing. Ondanks de succesvolle demonstratie, hadden meerdere actuatoren last van gebroken siliciumnitride. Daarom werd een tweede generatie van actuatoren ontwikkeld met een robuustere nitrideverbinding, meer ruimte tussen de nikkel structuren en een grotere verplaatsing. Daarnaast werd ook het ontwerp van het polysilicium verwarmingsselement aangepast om een betere verdeling van het temperatuurprofiel te krijgen. Deze verdeling was belangrijk om de maximale temperatuur te verminderen, terwijl er nog steeds voldoende thermische expansie werd gegenereerd.

De thermische actuatoren werden vervolgens gecombineerd in een vergrendelmechanisme om een bistabiele schakelaar te verkrijgen. De eerste generatie actuatoren werden gebruikt in een DPST schakelaar en waren in staat om succesvol te vergrendelen en te ontgrendelen. Ondanks dat de schakelaar in staat was om een lage schakelweerstand aan te houden, had één van de contacten de neiging om na meer dan 1×10^4 cycli minder stabiel te worden. Dit was te wijten aan het feit dat een sluiting van één contact een beperking oplegt op de sluiting van het andere contact. Een soortgelijk effect werd ook waargenomen bij de DPST versie van de schakelaar met actuatoren van de tweede generatie. Een andere beperking van de schakelaar is de lage doorslagspanning van de schakelaar, veroorzaakt door de kleine afstand tussen de warme arm en het polysilicium verwarmingsselement. Vanwege deze beperking werd er in de tweede generatie actuatoren en schakelaars een grotere spatiëring geïmplementeerd. Dit resulteerde in een doorslagspanning van meer dan 400 V. Bovendien werd de maximale stroom die de schakelaar aankan, vastgelegd op 400 mA. De kortst mogelijke timing was 3×50 ms. De schakelaars werden ook gekarakteriseerd in een cold-switching cyclische test, waarbij er werd vastgesteld dat bij lage stroomniveaus, de weerstand van de schakelaar relatief hoog kan worden na een groot aantal cycli. Wanneer de schakelaar echter langer gesloten bleef, daalde de weerstand als functie van de tijd. Dit effect werd toegeschreven aan kruip van de contactoneffenheden waardoor de effectieve contactoppervlakte groter werd. Cold-switching cyclische testen bij hogere stroomniveaus resulteerde in lage weerstanden voor de volledige test. Dit werd toegeschreven aan de versnelde kruip en het smelten van de oneffenheden. In hot-switching cyclische testen bleef de weerstand laag wanneer er 100 mW werd geschakeld met spanningen tot 10 V. Echter, bij het schakelen van 50 V trad er contact stictie op, waardoor de schakelaar niet geschikt is voor hot-switching van POTS lijnen. Cold-switching van deze lijnen moet mogelijk zijn aangezien dit werd aangetoond met een spanning van 200 V.

Om de thermische actuatoren in een vergrendelende schakelaar aan te sturen, werd er een aanstuurchip ontwikkeld. Deze chip, aangestuurd door middel van een I²C bus, genereert de vergrendelende of ontgrendelende sequenties met een aanpasbaar tijdsschema, een instelbare arbeidscyclus en een instelbare frequentie. Met 32 aanstuuruitgangen op de chip kunnen 32 actuatoren aangestuurd worden om zo 16 schakelaars te controleren in een 4×4 schakelmatrix. Voor deze aanstuurchip werd er ook een controleprogramma ontwikkeld.

De aanstuurchip en de MEMS schakelaars werden vervolgens gecombineerd om schakelmatrices te construeren. De eerste matrix, met een 4×4 DPST configuratie, had last van een slechte impedantieaanpassing en hoge reflecties als gevolg van de niet-getermineerde transmissielijnen, of stubs, in de kruisschakelaarstructuur. Een kleinere 2×2 DPST matrix zonder stubs vertoonde zeer goede RF karakteristieken tot 500 MHz. Voor de telecommunicatietoepassing zijn echter grotere matrices nodig. Daarom werden er 16×16 virtuele prototypes ontworpen en gesimuleerd. De 16×16 kruisschakelaarstructuur had een bruikbaar frequentiebereik van 30 MHz, waardoor het toepasbaar zou kunnen zijn voor VDSL2 toepassingen, hetzij met zeer weinig marge. Om het bruikbare frequentiegebied te verhogen werd er een schakelmatrix met afkoppelbare stubs ontwikkeld. Deze schakelmatrix kan worden gebruikt voor frequenties tot 200 MHz, die bijvoorbeeld nodig zijn voor G.fast. Bovendien is de matrixgrootte van 16 lijnen ook geschikt voor FTThdp implementaties. Om nog grotere matrices te kunnen construeren, werden Clos netwerken geanalyseerd en geoptimaliseerd. In de eerste optimalisatie werd het aantal schakelaars in het schakelnetwerk geminimaliseerd, wat resulteerde in een lagere kost dan een kruisschakelaarstructuur. Het gebruik van deze Clos netwerken heeft ook als voordeel dat het de matrix opsplitst in kleinere submatrices. Voortbouwend op dit idee, werd het schakelnetwerk ook geoptimaliseerd voor minimale kost maar met beperkingen op de maximale grootte van de submatrices. Dit leidde tot kortere stubs waardoor de RF-karakteristieken beter zouden moeten worden. Uit deze optimalisaties bleek dat deze maximale submatrixgrootte kan worden geruild voor een kleine stijging in het aantal schakelaars. Tot slot werden enkele verpakkingsmogelijkheden onderzocht en een conclusie werd getrokken. Ook een aantal opmerkingen en enkele suggesties voor verdere ontwikkelingen werden gegeven.

Summary

During the last few decades, the Internet has grown very rapidly. Not only the number of connected devices has increased a lot, also the amount of digital data being shared has grown drastically. In order to access this growing amount of data, higher bandwidths are needed. The ultimate broadband access solution is probably a fiber-to-the-home network. However, installing such a network requires huge investments, so operators try to reuse existing distribution networks such as the telephone access network or the cable distribution network. In case of the telephone network, twisted pairs were installed from the central office to street cabinets and from these street cabinets to the subscribers. In the central office, a main distribution frame is located, which enables the connection of the twisted pairs to the POTS equipment and the DSLAMs. Similarly, in a street cabinet, a smaller distribution frame is installed in order to connect the lines from the central office to the subscriber lines. Today, these distribution frames are in most cases still configured manually by inserting jumper wires. So every time a subscriber requests a new service or wants to change its service, a technician is dispatched to the street cabinet to manually insert jumper wires in the distribution frame. This process is very costly, time-consuming, and error-prone. Additionally, with the roll-out of faster access technologies such as VDSL or G.fast, the kilometers of twisted pairs do not provide enough bandwidth any more. Therefore, operators deploy an FTTN, FTTC, or FTTdp network, in which the DSLAMs are installed in network access nodes, street cabinets, or even smaller distribution point units in order to reduce the length of twisted pair. The DSLAMs are then connected with optical fibers to the core network. This move of the equipment being installed closer to the subscribers, results in more but smaller distribution frames because of the branching of the network. Dispatching a technician to these smaller cabinets, which are more geographically spread, increases the operational expenses even more. In order to reduce the cost of this manual intervention at geographically spread street cabinets in an increasingly competitive telecommunication market, an automated switching solution is needed. In this work, a MEMS-based switch matrix was developed which could be used in an automated distribution frame in street cabinets or DPUs.

As the MEMS-based switch matrix has to replace the manually configured distribution frame, its functionality should be the same. An important requirement for the switching solution is that it should possess a bistable property, which means that the open or closed state of the switch should be retained without applying power. In the manually configured distribution frame, the jumper wires are also retained. This bistable property was implemented using a mechanically latching mechanism where bistable states were obtained by

the sequential actuation of two thermal actuators.

As the generated thermal expansion in the actuators is very small, a displacement amplification mechanism is usually implemented. This results in the typical v-shaped actuators or two-hot-arm actuators, which are relatively long. Using these actuators in a latching mechanism results in a large L-shaped switch design, and is not very practical to stack compactly on a die. In order to solve this problem, a novel mechanism was developed which clamps the contacts, rather than latching them. In doing so, the necessary displacement of one of the contacts could be reduced, allowing the use of a linear actuator which exerts larger forces. The advantage of this mechanism was that the two actuators of the switch could be aligned next to each other, thereby saving a lot of chip area. The mechanism trades two intermediate displacements for a smaller and a larger displacement with the result of a more compact shape and an increased contact force. The mechanism was successfully demonstrated but was not further developed due to the low fabrication yield. The v-shaped actuators, the two-hot-arm actuators, and the linear actuator were fabricated in the MetalMUMPs technology, in which the structural layer is made of electroplated nickel. This resulted in a low drive impedance in the order of 1Ω . When driving these actuators with a current, it was observed that the displacement of these actuators was difficult to control. This was due to the positive temperature coefficient of resistance, which causes the resistance of the nickel to increase, causing a higher power being supplied. This amplifying effect resulted in a rapid increase of displacement which was difficult to control. Voltage driving, however, was neither ideal as the high currents would cause a large voltage drop in the connections to the actuators.

Because of these difficulties in controlling the displacement, a thermal actuator with a polysilicon heater was developed. This actuator consists of a hot and a cold arm, anchored to the substrate at one end, and anchored to each other at the other end using a silicon nitride plate. The hot arm was heated up by a polysilicon heater, fabricated underneath this arm. The electro-thermo-mechanical behavior of this actuator was analyzed using a 1-dimensional modeling of the structure. Starting from the applied current at the heater, the temperature profiles inside the actuator were calculated. Next, these temperatures were used to calculate the thermal expansion and the final displacement of the actuator. During the analysis, also the voltage over the heater, as well as the mechanical stress in the structure were calculated. The results of the modeling matched very well with finite-element simulations, despite the fact that the heat transfer was modeled using shape factors. The actuators were fabricated and the results of the modeling and the finite-element analysis matched with the measured results. The use of the polysilicon heater facilitated the voltage driving of the actuator and resulted in a better control over the displacement. Despite the successful demonstration, several actuators suffered from silicon-nitride cracking. Therefore, a second generation of actuators was developed with a more robust nitride connection, more spacing between the nickel beams, and a larger displacement. Additionally, also the design of the polysilicon heater was adjusted in order to get a better balancing of its temperature profile. This balancing was important to reduce the maximum temperature while still obtaining enough thermal expansion.

The thermal actuators were then combined in a latching mechanism in order to obtain a

bistable switch. The first-generation actuators were used in a DPST switch and were able to successfully latch and unlatch. Despite the switch being able to keep a low switch resistance, one of the contacts had the tendency to become less stable after more than 1×10^4 cycles. This was due to the fact that a closure of one contact imposed a restriction on the closure of the other contact. A similar effect was also observed with a DPST version of the switch using the second-generation actuators. Another limitation of the switch was the low breakdown voltage of the switch, caused by the small separation between the hot arm and the polysilicon heater. Because of this limitation, a larger separation was implemented in the second-generation actuators and switches. This resulted in a breakdown voltage of more than 400 V. Furthermore, the maximum current the switch can handle was set to 400 mA, and the shortest timing scheme was determined to be 3×50 ms. The switches were also characterized in a cold-switching cycling test, where it was observed that at low current levels, the switch resistance could become relatively high after a high number of cycles. However, when the switch was closed for a longer time, the resistance dropped as a function of time. This effect was attributed to creep of the contact asperities, causing the effective contact area to increase. Cold-switching cycling tests at higher current levels resulted in low switch resistances for the complete test, which was attributed to the accelerated creep and melting of the asperities. In hot-switching cycling tests, the switch resistance remained low when switching 100 mW up to 10 V. However, when switching 50 V, contact stiction occurred, making the switch not feasible for hot-switching of POTS lines. Cold-switching of these lines should be possible as it was demonstrated with a voltage of 200 V.

In order to drive the thermal actuators in a latching switch, a driver was developed. This driver chip, controlled through an I²C bus, generates the latching or unlatching sequence with an adjustable timing scheme, adjustable duty cycles, and an adjustable frequency. With 32 output drivers on the chip, 32 actuators could be driven in order to control 16 switches in a 4×4 switch matrix. For this driver chip, also a control program was developed.

The driver chip and the MEMS switches were then combined to construct switch matrices. The first matrix, a 4×4 DPST one, suffered from bad impedance matching and high reflections due to the open-ended transmission lines, or stubs, in the crossbar structure. A smaller 2×2 DPST matrix without stubs showed promising RF characteristics up to 500 MHz. However, for the telecommunication application, larger matrices are needed so 16×16 virtual prototypes were designed and simulated. The 16×16 crossbar structure had a usable frequency range of 30 MHz, which could make it applicable for VDSL2 applications, albeit with very little margin. In order to increase the usable frequency range, a switch matrix with disconnectable stubs was developed. This switch matrix could be used for frequencies up to 200 MHz, which are needed for G.fast, for example. Additionally, the matrix size of 16 lines is also suited for FTTdp deployments. In order to construct even larger matrices, Clos networks were analyzed and optimized. In the first optimization, the number of crosspoints in the switch network was minimized, resulting in a lower cost than a crossbar structure. The use of these Clos networks also has the advantage of splitting the matrix into smaller submatrices. Based on this idea, the switch

networks were also optimized for minimal cost but with restrictions on the maximal size of the submatrices. This resulted in shorter stubs and a better RF performance can be expected. From these optimizations, it was shown that this maximal submatrix size can be traded for a small increase in cost.

Finally, some packaging options were examined and a conclusion is drawn. Also some remarks on the work and suggestions for future work are given.