

# Vorschlag

für den

## Georg-Waeber-Innovationspreis 2008

des

## Förderkreises für die Mikroelektronik e.V.

### Thema:

*UV-Nanoimprint-Lithographie – ein kostengünstiges Verfahren zur Strukturierung nanoskaliger elektronischer Bauelemente*

### Vorgeschlagene Preisträger:

Dr. Michael Hornung

Süss MicroTec AG, Schleißheimer Straße 90, 85748 Garching

Gilbert Lecarpentier

S.E.T., Impasse Barteudet 131, 74490 Saint Jeoire, Frankreich

(ehemals Süss MicroTec S.A., Av. des Colombières, 74490 Saint Jeoire, Frankreich)

Dr.-Ing. Mathias Rommel

Fraunhofer IISB, Schottkystrasse 10, 91058 Erlangen

Dipl.-Ing. Holger Schmitt

Fraunhofer IISB, Schottkystrasse 10, 91058 Erlangen

### Preisvorschlag: Inhaltsverzeichnis

<b>1. Stand der Technik .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Innovation .....</b>	<b>3</b>
<b>3. Beiträge der vorgeschlagenen Preisträger .....</b>	<b>6</b>
<b>4. Technische und wirtschaftliche Bedeutung .....</b>	<b>8</b>
<b>5. Publikationsliste .....</b>	<b>9</b>

## 1. Stand der Technik

Die gezielte Strukturierung von Oberflächen mittels optischer Lithographie und reaktiver Ionenätzverfahren war in den letzten Jahrzehnten ein entscheidender Faktor für den rasanten Fortschritt in der Mikro- und Nanoelektronik. Die stetige Weiterentwicklung innovativer optischer Lithographiesysteme („Stepper“) und reaktiver Ionenätzverfahren ermöglichte hierbei die Miniaturisierung elektronischer Bauelemente. Dem gegenüber stehen allerdings die zunehmenden Investitions- („Stepper“: bis 20 Millionen €) und Betriebskosten (Maskensatz: mehrere Millionen €) für die optische Lithographie. Da die herkömmlichen optischen Lithographiesysteme die zukünftigen Anforderungen bzgl. des Auflösungsvermögens wahrscheinlich nicht mehr erreichen werden, besteht ein stetig wachsendes Interesse an alternativen Nanostrukturierungsverfahren. Eines der möglichen Verfahren ist die Extreme-Ultraviolett-Lithographie (EUV-Lithographie), deren Einsatz allerdings mit extrem hohen Kosten verbunden ist. Eine weitere Alternative zur kostenintensiven optischen Lithographie ist die weit kostengünstigere Nanoimprint-Lithographie (NIL) für alle Arten der Nanostrukturierung.

Die NIL wurde bereits 2003 in die „International Technology Roadmap for Semiconductors“ (ITRS) als Strukturierungskandidat für den 32 nm Technologieknoten aufgenommen. Das hohe Auflösungsvermögen der NIL (aktuell bis 6 nm) wird maßgeblich durch eine Prägeform bestimmt, deren Relief in einen Prägelack übertragen wird. Nach dem Prägevorgang bleibt das Negativ des Prägeformreliefs auf dem Substrat zurück. Je nach Anwendung werden die geprägten Lackstrukturen entweder als Maskierung für nachfolgende Prozesse (Ätzen, Implantation) oder als fertiges Produkt verwendet. Neben einer hohen Auflösung, wie sie für zukünftige Chipgenerationen benötigt wird, ist ein weiteres herausragendes Merkmal der NIL die hohe Wiedergabetreue selbst für komplexe dreidimensionale Elemente. So können im Bereich der Metallisierung elektronischer Bauelemente durch die direkte 3D-Strukturierung Kontaktlöcher und Leiterbahnen einer Metallisierungsebene in einen UV-härtenden Prägelack („low-k“) geprägt werden, wodurch im Vergleich zur aktuellen Technologie („dual damascene“) etwa 15 Prozessschritte pro Metallisierungsebene eingespart werden.

Für die Art der Strukturübertragung gibt es hauptsächlich zwei Ansätze, die im Fokus der Halbleiterindustrie und anderer Industriezweige stehen, das Heißprägen und die UV-Nanoimprint-Lithographie. Beim Heißprägen wird ein Thermoplast, das zuvor auf ein Substrat aufgeschleudert wurde, durch eine harte Prägeform, die zumeist aus Silicium oder Nickel besteht, mechanisch verformt. Nach dem Prägeprozess bleibt das negative Relief der Prägeformstrukturen im Prägelack zurück, welches für die weitere Prozessierung verwendet wird. Für die Strukturübertragung ist ein Prägedruck größer als 20 bar und zumeist eine hohe Temperatur notwendig. Der hohe Prägedruck und die Temperaturwechsel stellen die Nachteile dieses Verfahrens dar, da sich hieraus zum

einen relativ lange Prozesszeiten ergeben und zum anderen Beschädigungen an bereits existierenden Substratstrukturen auftreten können.

Beim zweiten Verfahren, der UV-Nanoimprint-Lithographie, werden belastende Temperaturzyklen oder hohe Prägedrücke für die Strukturübertragung vermieden. Die Aushärtung des Prägelacks erfolgt bei der UV-NIL in den Strukturen der Prägeform mittels UV-Licht, wobei der Prägelack selbst bei Raumtemperatur so niederviskos ist, dass schon ein Prägedruck von 1 bar oder geringer ausreichend ist. Je nach Bearbeitungsmethode kann man das Substrat ganzflächig mit einer Prägeform in einer Prägung oder Feld für Feld mit einer kleineren Prägeform strukturieren. Bei der ganzflächigen Strukturierung erhält man einen sehr hohen Durchsatz, wobei die Notwendigkeit des vollflächigen und planparallelen Kontakts sowie die Kräfte, die zur Trennung von Lack und Prägeform aufgebracht werden müssen, limitierend wirken. Bei der zweiten Methode, die auch als „step and repeat“ Verfahren bezeichnet wird und welche in der Projektions-Lithographie zum Einsatz kommt, wird das Substrat Feld für Feld strukturiert. Bei der zweiten Art der Bearbeitung wird jedes Feld vor der Strukturierung justiert, wodurch hohe Überlagegenauigkeiten erreicht werden und die Anforderungen sowohl an die Planparallelität als auch an die Trennkräfte geringer sind.

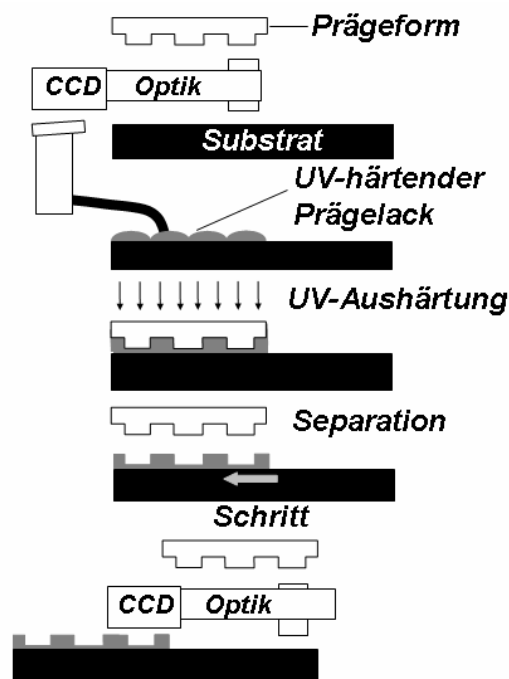
## 2. Innovation

Die Übertragung von Nanostrukturen ist aktuell nur mit einem erheblichen Kostenaufwand zu erreichen. Zudem ist vor allem bei optischen Lithographieverfahren die Auflösung durch Beugungseffekte limitiert. Die Limitierung der Auflösung auf Grund von Beugungseffekten tritt bei der UV-NIL dagegen nicht auf, wodurch sich diese Technologie grundlegend von optischen Verfahren unterscheidet. Das Prinzip der UV-NIL „step and repeat“ Strukturübertragung ist in Abbildung 1 gezeigt. Die einzelnen Schritte beim Prägevorgang sind hierbei folgende:

- Justage der Prägeform zum Substrat
- Aufbringen des Prägelacks
- Prägevorgang und UV-Aushärtung des Prägelacks
- Separation
- Anfahren der nächsten Position.

Anders als bei optischen Lithographieverfahren ist die UV-NIL in industriellen Prozessen noch nicht in der Art etabliert, dass die gesamte Prozesskette aus einer Hand angeboten wird. Viele Prozessschritte beruhen auf Eigenforschung und finden noch selten in Kooperation mit Anlagenherstellern statt. Dies ist allerdings eine Grundvoraussetzung zur Kommerzialisierung eines neuartigen Verfahrens wie die UV-NIL. Für einen erfolgreichen Einsatz der UV-NIL müssen folgende Anforderungen erfüllt werden:

- Herstellung von UV-transparenten Prägeformen mit minimalen Strukturbreiten von wenigen 10 Nanometern
- Entwicklung einer stabilen Imprintanlage
- Evaluierung und Optimierung zahlreicher Prozessparameter (unter anderem Prägelacke, Haftungseigenschaften und Ätzprozesse) um a) eine Substratstrukturierung und b) eine Kompatibilität der UV-NIL mit etablierten Halbleitertechnologien zu erreichen.



**Abbildung 1: Schematische Darstellung des UV-NIL Prägevorgangs im „Step and repeat“ Verfahren**

Die Herstellung einer defektfreien Prägeform ist für den erfolgreichen Einsatz der UV-NIL maßgeblich, da das Relief der Prägeform im optimalen Fall 1:1 in den Prägelack übertragen wird. Defekte in der Prägeform verringern die Ausbeute dagegen entscheidend, da diese wiederholt übertragen werden. Auf Grund des UV-NIL Prägeverfahrens muss das Material, das für die Prägeformherstellung eingesetzt wird, bestimmte Grundmerkmale besitzen. Da die Aushärtung des Prägelacks im Kontakt mit der Prägeform mittels UV-Licht erfolgt, muss das Material eine hohe Transmission für die Belichtungswellenlänge der Imprintanlage besitzen. Des Weiteren muss das Substrat zur Herstellung der Prägeform eine sehr homogene Dicke aufweisen, da eine Welligkeit in einer starken Restlackschichtdickenvariation resultiert. Schließlich muss das Ausgangsmaterial eine geringe Rauheit besitzen, um keine Defekte zu erzeugen. Für viele Anwendungen ist die Kontrolle der kritischen Dimension während des gesamten Herstellungsprozesses entscheidend. So wird z.B. bei einem Transistor die

Einsatzspannung unter anderem aus dem Verhältnis von Kanalweite zu Kanallänge bestimmt. Wird der Gatefinger eines Transistors mittels UV-NIL strukturiert, so darf bei der hierfür notwendigen Prägeformherstellung kein Ätzprozess die zuvor mittels Elektronenstrahl-Lithographie definierten Größenverhältnisse ändern. Des Weiteren müssen die Prägeformätzprozesse in möglichst rechteckigen Profilen resultieren, damit es nicht zu einem Abreisen der geprägten Strukturen während der Separation oder zu einer Strukturbreitenänderung während des Substratätzprozesses kommt.

Die Imprintanlage ist für die Übertragung der Prägeformstrukturen in einen Präge Lack entscheidend. Ein stabiles und verlässliches Anlagenkonzept ist dafür eine Voraussetzung, nicht nur für den Prägeprozess. Von den Preisträgern wurden im Rahmen des Bayerischen Forschungsverbundes für Nanoelektronik (FORNEL) zur Meisterung der genannten Herausforderungen entscheidende Beiträge geleistet und direkt an industriellen Anlagen umgesetzt. Die Firma Süss MicroTec AG hat langjährige Erfahrungen in der Entwicklung und im Betrieb von Maskalignern und Devicebondern, welche die Plattform für deren Imprintanlagen bilden.

Zum einen wurde für einen bestehenden Maskaligner (MA6/8) eine vor allem für die Anwendung in Forschungseinrichtungen konzipierte Imprinterweiterung entwickelt. Um hierfür einen maximalen Kosten-Nutzen-Effekt zu erzielen, wurde ein Aufrüstsatz entwickelt, der extern an einen Maskenjustierer angeschlossen wird und somit keine maschinentechnischen Veränderungen an der ursprünglichen Anlage notwendig macht. Somit wird eine Veränderung der Spezifikationen der ursprünglichen Anlage vermieden und ein reibungsloser Wechsel zwischen klassischer Kontakt-Lithographie und Imprinten ist gewährleistet.

Zum anderen wurde der Imprintstepper NPS300, der auf einen Devicebonder basiert, entscheidend optimiert. Dieser ist aufwändiger umgesetzt als die Imprinterweiterung der MA6 und zielt in Richtung der industriellen Anwendung. Hier wurden zahlreiche Verbesserungen seitens des IISB erarbeitet und von der Süss MicroTec AG integriert (verbesserter Imprintkopf und „self-levelling“-System, Integration eines Ink-Jet Systems zur Lackaufbringung). Mit beiden Imprintanlagen ist es möglich, kostengünstige Strukturübertragungen im nm-Bereich durchzuführen.

Neben der Herstellung von Prägeformen und der Verfügbarkeit einer marktreifen Imprintanlage ist es wichtig, eine Prozesskette zur Substratstrukturierung aufzubauen. Die Entwicklungen einer solchen Prozesskette ermöglicht deren Demonstration gegenüber potentiellen Kunden der Imprintanlagen. Daher wurde ein Prozess zur Herstellung von Kurzkanal MOSFETs mit Kanallängen unter 100 nm entwickelt. Die Herstellung des Gatefingers erfolgte hierbei mittels UV-NIL und reaktiver Ionenätzprozesse, die restliche lithografische Strukturierung erfolgte mittels optischer Lithographie („mix and match“). Wichtig im Rahmen der Prozessentwicklung war auch, dass die UV-NIL kompatibel zu konventionellen Si-Halbleitertechnologien ist. Somit

kann die Herstellung kritischer Strukturgrößen mittels UV-NIL erfolgen während die restlichen Prozessschritte im Rahmen der aktuellen Technologie durchgeführt werden.

### **3. Beiträge der vorgeschlagenen Preisträger**

Das Ziel der Arbeiten der vorgeschlagenen Preisträger war die Entwicklung einer stabilen, kostengünstigen und flexiblen Methode für die Übertragung von Strukturen im nm-Bereich. Die entscheidenden Faktoren sind die Entwicklung einer Imprintanlage, die im „step and repeat“-Verfahren arbeitet, die Herstellung UV-transparenter Prägeformen und die UV-NIL Prozessentwicklung, die kompatibel zur Si-Halbleitertechnologie ist.

Zu Beginn der Kooperation wurde ein speziell für die UV-NIL entwickelter Prototyp des Imprintsteppers NPS300 der Süss MicroTec AG durch das IISB erworben. Ziel der Kooperation war es, die Nanoimprintanlage im Hinblick auf die aktuellen Anforderungen in der Mikro- und Nanoelektronik zu optimieren und auf längere Sicht alternative Einsatzgebiete wie z.B. in der Optik oder Biomedizin zu erschließen. In enger Zusammenarbeit von Dipl.-Ing. Holger Schmitt und Gilbert Lecarpentier wurden entscheidende Verbesserungen an der NPS300 durchgeführt. So wurde unter anderem der Imprintkopf optimiert, ein sensitiveres „self-leveling“-System installiert (passiver Ebenenausgleich zwischen Prägeform und Substrat, notwendig für einen planparallelen Imprint) und ein Ink-Jet-System (schnellere und strukturabhängige Lackaufbringung; Reduzierung der Restlackschichtdicke um eine Größenordnung, wodurch eine Substratstrukturierung im sub-100 nm Bereich ermöglicht wurde) incl. deren Ansteuerung integriert. Mit diesen Modifikationen wurde die NPS300 zur Marktreife gebracht.

Zusätzlich wurden die im Betrieb des Imprintsteppers NPS300 gewonnenen Erfahrungen durch Dr. Michael Hornung, von der Süss MicroTec AG aufgegriffen, um ein kostengünstiges Konzept für die Erweiterung des Maskaligners MA6 zu einer Imprintanlage zu entwickeln und umzusetzen. Mit diesem wurden Nanoimprints in ein „spin-on“ Polymer übertragen. Die minimal übertragene Strukturbreite betrug hierbei 50 nm. Mit der Erarbeitung der Ergebnisse für die Imprintanlagen wurden entscheidende Voraussetzungen geschaffen, um die UV-NIL als kostengünstiges Strukturierungsverfahren im nm-Bereich einsetzen zu können.

Parallel zur Entwicklung der Imprintanlagen wurde die Herstellung von Prägeformen mittels Elektronenstrahl-Lithographie und reaktiver Ionenätzverfahren durch das IISB evaluiert. Aktuell kann man Prägeformen für einige 1000 € bis 10 000 € pro Stück erwerben. Für die Herstellung der etablierten Prägeformen werden 6 Zoll Maskenblanks mit einer Dicke von 6,35 mm verwendet und aus diesem Substrat vier Prägeformen mit einer Größe von 65-65 mm<sup>2</sup> hergestellt. Am IISB wurden dagegen ein neues Konzept

und eine entsprechende Prozessfolge zur Herstellung von Quarzprägeformen durch Dipl.-Ing. Holger Schmitt, unterstützt von Dr.-Ing. Mathias Rommel, entwickelt. Mit dem neuen Konzept wurden aus einem Quarzsubstrat mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Dicke von 675 µm 64 Quarzprägeformen hergestellt, die auf einen 65-65 mm<sup>2</sup> großen Quarzhalter mittels eines UV-transparenten Schmelzklebers befestigt wurden. Die Prägeformen können beliebig auf dem Quarzhalter ausgetauscht werden. Zusätzlich wurde im Vergleich zum etablierten Konzept das sogenannte Mesaätzen vermieden. Mit dem neuen Konzept war es möglich, die Gesamtkosten pro Prägeform, im Vergleich zu den aktuell erhältlichen Prägeformen, um eine Größenordnung zu reduzieren.

Mit der Herstellung von Prägeformen und der Verfügbarkeit einer stabilen Imprintanlage wurden wichtige Voraussetzungen geschaffen, um Strukturübertragungen in verschiedene Prägelacke zu erreichen. Hierfür wurden die Wechselwirkung zwischen Prägelacken und verschieden vorbehandelten Silicium-Substraten sowie Antihafschichten untersucht. Darüber hinaus wurden Prozesse entwickelt und optimiert, um von der Übertragung der Prägeformstrukturen in einen Prägelack zu einem elektronischen Bauelement zu gelangen. Hierbei wurden funktionierende sub-100 nm MOSFETs prozessiert und somit das Potential der UV-NIL als kostengünstiges Nanostrukturierungsverfahren für elektronische Bauelemente nachgewiesen.

Bei den hier vorgeschlagenen Preisträgern handelt es sich um Mitarbeiter, die durch ihre FuE-Arbeiten wesentlich bei der Entwicklung und Kommerzialisierung des neuartigen Nanostrukturierungsverfahrens für die Halbleitertechnologie beigetragen haben. Die vorgeschlagenen Preisträger sind in alphabetischer Reihenfolge genannt.

- Dr. Michael Hornung  
Süss MicroTec Lithography GmbH, Schleissheimer Straße 90, 85748 Garching  
Funktion: Anwendungsbezogene strategische Entwicklung  
Beiträge: Entwicklung der MA6/8 Imprinterweiterung
- Gilbert Lecarpentier  
S.E.T., Impasse Barteudet 131, 74490 Saint Jeoire, Frankreich  
Funktion: Internationaler Produktmanager Devicebonder und NIL  
Beiträge: Umsetzung der Verbesserungsvorschläge für die NPS300
- Dr.-Ing. Mathias Rommel  
Fraunhofer IISB, Schottkystrasse 10, 91058 Erlangen  
Funktion: Gruppenleiter Analytik  
Beiträge: Koordination der UV-NIL Aktivitäten
- Dipl.-Ing. Holger Schmitt  
Fraunhofer IISB, Schottkystrasse 10, 91058 Erlangen  
Funktion: Mitarbeiter Abteilung Technologie

Beiträge: Evaluierung NPS300, Konzept und Herstellungsprozess für Prägeformen sowie Etablierung von UV-NIL Prozessen, die kompatibel zur Si-Halbleitertechnologie sind

#### **4. Technische und wirtschaftliche Bedeutung**

Nanostrukturierungsprozesse mittels UV-NIL sind gegenüber herkömmlichen optischen Verfahren für MEMS, MOEMS und nanoelektronische Bauelemente wesentlich kostengünstiger und erlauben eine hohe Wiedergabetreue, selbst für komplexe 3D-Strukturen („dual damascene“). Damit wird auch kleinen und mittelständischen Firmen sowie Forschungseinrichtungen die Möglichkeit zur kostengünstigen Nanostrukturierung gegeben. Dies stellt die Basis dar, an innovativen Entwicklungen im Bereich MEMS, MOEMS und Nanoelektronik teilzuhaben.

Für das IISB erwies sich die Entwicklung der UV-NIL als außerordentlich erfolgreich. So konnten mit dem gewonnenen „know-how“ die Kooperationen mit der Firma Süss MicroTec AG intensiviert werden. Alle Bauelemente in der Nanoelektronik, sowohl in der Entwicklung als auch in der Produktion, benötigen Nanostrukturierungsprozesse, die zukünftig am IISB durchgeführt werden. Die Entwicklung von kostengünstigen Prozessen zur Nanostrukturierung stellt ein wichtiges Instrument für zukünftige wissenschaftliche Arbeiten und die Akquise von externen Aufträgen dar. Der Nachweis des erfolgreichen Einsatzes der UV-NIL als Nanostrukturierungsverfahren ermöglicht eine hervorragende Ausgangsbasis bei der Beantragung von weiteren zukunftsweisenden Forschungsprojekten (aktuell ein Projekt in Planung). So können z.B. mit dem entwickelten Herstellungsprozess für Kurzkanal MOSFETs unterschiedliche Gatematerialien und Gatedielektrika, zwei Schwerpunktthemen der Abteilung Technologie am IISB, auf ihre Eigenschaften in zukünftigen Bauelementegenerationen untersucht werden. Zusätzlich können neue Kompetenzen im Bereich der „dual damascene“ Technologie, der Herstellung von nanoskaligen Datenspeichern („crossbar array“) und MEMS aufgebaut werden. Auf Grund der Ergebnisse des Projekts und der zahlreichen neuen Kontakte zu Forschungsinstituten und Industrieunternehmen wurden am IISB zwei Industrieaufträge bearbeitet und zwei weitere sind aktuell in Arbeit. Des Weiteren bestehen weitere Anfragen für UV-NIL Prozessentwicklungen. In der stetigen Weiterentwicklung des UV-NIL Verfahrens und der Entwicklung von kundenspezifischen Prozessen wird ein zunehmendes wissenschaftliches und wirtschaftliches Potential gesehen.

Die Süss MicroTec AG mit seinen weltweit ca. 760 Mitarbeitern hat sich eine gute Position in dem schnell wachsenden NIL Markt erobert. Im Laufe der Entwicklung der NPS300 zur Marktreife ergaben sich etwa 10 Anfragen und Demonstrationen des am IISB entwickelten Imprintprozesses für Kunden der Süss MicroTec AG.



Die Markteinführung der neuen Imprinterweiterung für die MA6 erfolgte im Frühling 2008. Bereits nach kurzer Zeit wurden vier Systeme verkauft und zahlreiche weitere Anfragen lassen eine erfolgreiche Vermarktung erwarten. Da sich die Imprinterweiterung bei bestehenden Maschinen einfach nachrüsten lässt und weltweit über 1000 Geräte des Typs MA6/8 installiert wurden, lässt sich leicht erkennen, welches große Potential, für die Vermarktung der UV-NIL Technologie besteht.

## 5. Publikationsliste

H. Schmitt, L. Frey, M. Rommel, C. Lehrer und H. Ryssel, *UV nanoimprint materials: Surface energies, residual layers, and imprint quality*, J. Vac. Sci. Technol. B **25**, 785 (2007)

H. Schmitt, M. Zeidler, M. Rommel, A. J. Bauer und H. Ryssel, *Custom-specific UV nanoimprint templates and life-time of antisticking layers*, Microelectron. Eng., in press

H. Schmitt, M. Zeidler, M. Rommel, A. J. Bauer und H. Ryssel, *Custom-specific UV nanoimprint templates and life-time of antisticking layers*, Poster MNE 2007, Kopenhagen