

Diss. ETH No. 17261

On Maskless Gold Nanoparticle And Carbon Nanotube Deposition And Processing For Device Nanomanufacturing

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
CEDRIC P. R. DOCKENDORF

Dipl. Masch.-Ing. ETH
Born on February 22nd, 1979
citizen of Luxembourg

on the recommendation of
Prof. Dr. Dimos Poulikakos, examiner
Prof. Dr. Bradley J. Nelson, co-examiner

Zurich, 2007

Summary

Over the last decades a lot of effort has been put into the development of nano- and microscale technologies. The consistent trend in the microelectronics industry still is towards ever smaller feature sizes, such as to place a maximum of transistors on chips. Computer chips of the latest generation have transistor channels which are well in the nanorange. The number of transistors per area has doubled every 18 months over the last 30 years, as is stated by Moore's law. Despite all these achievements, the price of chips by unit area did not follow this evolution and stayed almost the same since the early days of the IC industry. Novel applications on new substrate materials are showing up. Whereas traditional microelectronics was based on the processing of silicon wafers, new applications make use of all kinds of different substrate materials ranging from polymers to cardboard or biomaterials. Despite this difference some of these new applications will require pattern of the same sizes as those available to conventional microelectronics. A number of fabrication methods have been proposed to address these issues. Inkjetting of nanoparticles suspensions (nanoinks) appears to be a fabrication method which is particularly promising for low cost manufacturing, but it is limited in regard to pattern size reduction. In this thesis we present a few methods to overcome some of the limitations of gold nanoink based manufacturing techniques in regard of size reduction. We used glass capillaries pulled into micropipettes for the deposition of gold nanoink pattern. They have the advantage that they can easily be produced in a lab environment and are available in a large variety of diameters. With oil immersion laser annealing of gold nanoink pattern, line widths of around 1 μm can be achieved. This has the potential to be extended into the nanoscale. A second method shows that the wetting behavior of gold nanoinks can be used to shrink a line pattern to nearly half of its original size before annealing. Nanoinks deposited with capillary tubes in combination with polymer deposition can be used as multilayer interconnects. Carbon nanotubes are a very interesting material for nanotechnology. By using the fountain-pen setup a simple and low-cost method to contact carbon nanotubes with gold nanoink is introduced. In this way contact resistances that are of the same order of magnitude as those achieved conventional contact methods are demonstrated. Conventional ways of contacting carbon

nanotubes include focused-ion beam and electron beam lithography. These are complicated and expensive methods to contact carbon nanotubes or nanowires in general. There is a growing interest in flexible electronics in low-cost applications such as disposable sensor. A flexible field-effect transistor with nanoscale channel length and width is fabricated. The transistor has carbon nanotubes as electrodes. The carbon nanotube source and drain are contacted by gold nanoink. The whole structure is deposited on a polyimide film.

In this thesis we demonstrate that deposited gold nanoink films can be further reduced before final curing of the pattern. This is of particular interest to inkjet based microfabrication. Applications of gold nanoparticle inks as interconnects and for carbon nanotubes are shown.

Zusammenfassung

Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurden beachtliche Ressourcen in die Entwicklung von Herstellungsverfahren im Mikro- und Nanobereich investiert. Der kontinuierliche Trend hin zu immer kleineren Strukturen wird mit grosser Wahrscheinlichkeit auch in naher Zukunft noch anhalten. Wie im Moore'schen Gesetz vorausgesagt, verdoppelt sich die Anzahl Transistoren pro Fläche in einem Rhythmus von etwa 18 Monaten. Ziel ist es eine maximale Anzahl an elektronischen Bauteilen wie zum Beispiel Transistoren auf Chips zu integrieren. Rechnerprozessoren der neuesten Generationen haben bereits Transistoren in der Grössenordnung von einigen zehn Nanometer. Trotz diesen Fortschritten, haben sich die Kosten der Herstellung von Mikroelektronik nicht im gleichen Mass verbessert.

Die Erfolge der herkömmlichen Mikrotechnik basieren auf Silizium Substraten. Immer öfter jedoch tauchen Anwendungsbereiche für mikroelektronische Systeme auf, in denen man nicht auf Silizium zurückgreifen kann. Beispiele hierzu wären Einweg-elektronik für sogenannte „Smart Labels“ oder Sensoren für biomedizinische Anwendungen. Mit neuartigen Herstellungsverfahren versucht man diese Probleme zu lösen. Besonders vielversprechend in dieser Hinsicht sind Druckverfahren. Einige Druckverfahren insbesondere Tintenstrahldrucker sind in Bezug auf weitere Verkleinerung der Druckmuster jedoch eingeschränkt. In dieser Arbeit werden ein paar Lösungsansätze zu diesem Problem vorgeschlagen. Zum Auftragen von Goldnanopartikel Lösungen wurden Mikropipetten aus Glaskapillaren benützt. Diese haben den Vorteil, dass die Durchmesser von solchen Pipetten fast beliebig verändert werden können. Das Laser-Sintern von Goldnanopartikel Flüssigkeiten mit Hilfe von Immersionsoptik erlaubt es Strukturen mit Durchmessern von 1 μm herzustellen. Eine weitere Methode die vorgestellt wird, erlaubt es durch Ausnützen der Benetzungseigenschaften von Nanopartikel Flüssigkeiten, gedruckte Strukturen gezielt zu „schrumpfen“. Die Durchmesser von gedruckten Linien konnten so um die Hälfte des ursprünglichen Durchmessers reduziert werden. In dieser Arbeit wird ebenfalls gezeigt, dass mit Hilfe von Goldnanopartikel Lösungen mehrschichtige Verbindungen zwischen einzelnen

elektronischen Elementen auf Polymersubstraten geschrieben werden können. Dies ist besonders für Anwendungen in der flexiblen Elektronik von Interesse.

Wegen ihrer einzigartigen Eigenschaften sind Carbon Nanotubes besonders gut als Bauteile für Nanotechnologien geeignet. Mit Goldnanopartikel können auf Elektroden aufliegende Carbon Nanotubes besonders einfach kontaktiert werden. Die erzielten Konatktwiderstände sind in der gleichen Grössenordnung wie diejenigen die mit herkömmlichen Methoden erreicht werden. Herkömmliche Methoden zum Kontaktieren von Kohlenstoff Nanoröhrchen sind sehr teuer und umständlich, im Gegensatz hierzu ist das Kontaktieren mit Nanopartikel Carbon Nanotubes sehr und kostengünstig.

Das Interesse an flexibler Elektronik nimmt besonders im Zusammenhang mit Wegwerfelektronik kontinuierlich zu. In Kapitel 9 wird ein Herstellungsverfahren für flexible Feldeffekt Transistoren mit Sperrbereich Längen im Nanobereich gezeigt. Emitter und Basis des Transistors sind aus Carbon Nanotubes, die mit Hilfe von Gold Nanopartikel kontaktiert wurden. Die Struktur ist auf biegsamem Polyimid gefertigt.

In dieser Arbeit werden einige Methoden zur Verkleinerung von Nanopartikel Strukturen aufgezeigt. Dies ist besonders für Druckverfahren von Interesse. Desweiteren werden Anwendungen von Oberflächenstrukturierung mit Goldnanopartikel in mehrschichtigen Schaltkreisen und Verarbeitungsmöglichkeiten mit Kohlenstoffröhrchen gezeigt.