

MİKROKANALLARIN ÜRETİM METOTLARI

THE METHODS OF FABRICATING MICRO CHANNELS

Levent TRABZON

İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Malzeme ve İmalat A.B.D.

ÖZET

Mikrokanallar mikro-akışkan sistemlerinin temel unsurlarından olduğundan, mikrokanalların üretimi çok önemlidir. Birçok farklı üretim metodu vardır: Si yüzey mikroşileme, Si gövde mikroşileme ve polimer mikroşileme gibi. Polimerlerin kullanımı özgün bir üretim teknolojisi oluşturduğundan, mikrokanalların polimerden yapılması ayrı olarak incelenecektir. Seçilen üretim teknolojisine göre, mikrokanalların genişliği birkaç mikrometreden yüz mikrometre seviyelerinde, ayrıca mikrokanalın yüksekliği birkaç mikrometreden on mikrometre mertebelerinde olabilir. Mikrokanallar metallere, camdan, seramiklerden ve polimerden üretilir. Geniş bir malzeme seçeneği olması, her tür malzeme türünün içerdiği zorlukları da beraberinde getirir. Mikrokanalın üretim metodunun seçimi, tümleşik devre teknolojisi uyumluluğu, üretimde yüksek verime, silisyum plakasının çok amaçlı kullanımına imkan vermesi ve özel tasarımların getirdiği şartlar gibi parametrelere bağlı olarak belirlenir.

Anahtar Kelimeler: Mikrokanal, Si yüzey ve gövde mikroşileme, Polimer mikroşileme

ABSTRACT

The fabrication of microchannels is very critical part of microfluidic devices since the microchannels are essential part of them. There are several ways of fabricating of microchannels: Si surface micromachining, Si bulk micromachining and polymer micro-machining. Since the use of polymers gives us a unique fabrication scheme for microchannels formation, it is evaluated as a separate section in the text. Depending on the choice of the method, the width of microchannels can be several microns to hundreds of microns as well as the height of microchannel can be also tailored in a range from 1 micron to several ten microns. The microchannels are made of metals, ceramics, glass and polymers, thus there is a wide range of selection for materials, but, with some constraints by fabrication. The IC technology compatibility, high yield multi-purpose use of silicon wafer and customized characteristics are just main parameters in choosing the type of methods for the fabricating of microchannels.

Keywords: Microchannel, Si surface and bulk micromachining, Polymer micromachining

Giriş

Mikroteknoloji üretim yöntemleri sayesinde daha yüksek hassasiyet, daha düşük maliyet ve performans, yüksek sistem verimine sahip mikrosistemler veya mikroelektromekanik sistemler (MEMS) elde edilir [1,2]. MEMS temelde entegre üretim teknolojisinin yöntemlerini değişiklik ve eklemeler yaparak kullanmaktadır [3-5]. Mikrosistem üretim teknolojisi temelde yapısal malzeme olarak Poli-Si (Çok kristalli silisyum), yalıtkan malzemesi olarak silisyum nitrat (Si_3Ni_4), heba malzemesi olarak silisyum oksit (SiO_2) ve iletken malzeme olarak alüminyum kullanılır [6,7]. Bunun yanında, entegre devre ve MEMS teknolojisinin arasındaki en önemli fark, MEMS üretiminde çok farklı malzemelerin kullanılmasıdır [8-11]. Ticarileştirilmiş MEMS ürünleri yukarıda bahsedildiği gibi temel

INTRODUCTION

Microtechnology is an enabling technology by means of which it is possible to fabricate microsystems or microelectromechanical systems (MEMS) to obtain higher sensitivity, lower cost, better performance and improved system yield [1,2]. MEMS basically utilize the integrated circuit (IC) processing with some modifications and additions of microelectronics technology [3-5]. The main materials used in the microfabrication are Poly-silicon (Poly-Si) as a structural material, silicon nitride (Si_3Ni_4) as an insulator, silicon oxide (SiO_2) as a sacrificial one and aluminum (Al) as a conducting material [6,7]. However, one of the main differences between IC and MEMS technology is arising in the variety of materials used in the fabrication, since there are almost all kind of materials being used

malzemeler kullanılarak üretilmiştir. Ürün olarak çok başarılı MEMS ürünlerini görmek mümkündür. Hava yastıklarında kullanılan mikro ivmeölçerler, optik yansıtıcılarda kullanılan mikro aynalar, mürekkep püskürtmeli (inkjet printers) yazıcılarda kullanılan mikro nozullar endüstriyel son ürünlerde kullanılan birkaç örnektir. Endüstriyel ürünlerde kullanılan mikrosistemler arasında, akışkan-MEMS sensörleri % 5 ile 10 arası bir market payına sahiptir, bu oran sürekli artmaktadır. Mikro-akışkan sistemleri sağlık biliminde (minyatür sıvı analizinde), mikro laboratuvar sisteminde, mikro karıştırıcılarda, mikro soğutucularda, bio-teknolojide (Mikro-PCR-Polimerize Zincir Reaksiyonu), farmakoloji gibi birçok alanda kullanıldığını görürüz. Bu sistemlerin en önemli birimlerinden biri mikroakışkan sistemlerin farklı bölümlerini birbirine bağlayan mikro kanallardır. Mikro kanallar, rezervuarlar için bağlantı elemanı ve/veya reaksiyon alanı olarak, kromotografi için ayrıştırıcı olarak veya mikro soğutucular için boru işlevi görürler.

Mikroakışkan uygulamaları için farklı geometrik ebatlarda olan mikro kanalları üretmek için değişik teknolojiler vardır. Bunların arasında, gövde mikroişleme tekniğinde olan silisyum plakasını (Si-wafer) aşındırma prosesleriyle, geniş ve büyük ölçekli mikro kanallar üretmek mümkündür [7,12]. Kanalları kapalı duruma anodik bağlama yöntemiyle getirilir. Bağlamanın kalitesi ve hizaya getirilmesi gibi dikkat edilecek dezavantajları vardır. Fakat, kolay bir şekilde cam altlıkla entegre edilip 3 boyutlu mikroakışkan sistemleri oluşturulabilir. Son zamanlarda gövde mikroişleme tekniğinin içerdiği olumsuz yönleri giderecek teknikler geliştirilmiştir [13]. Elektronik devreyle mikro-akışkan sistemlerin kolay entegrasyonunu sağlamak için yüzey mikroişleme kullanılır. Yüzey mikroişleme birbirini takip eden kaplama ve aşındırma proses adımlarından oluşur [6,14,15]. Fakat, üretilen kanallardaki boyut sınırlaması, yüzey mikroişleme tekniği bazı uygulamalarda tercih edilmez. Geleneksel tekniklerin içerdiği zorlukları aşmak için, hibrit yaklaşımı yani

in the fabrication of MEMS [8-11]. On the other hand, the commercialized MEMS products are fabricated by just few materials of MEMS technology as stated above. There are several successful MEMS products in the market. The microaccelerometers used in the airbags, the micromirrors in the optical projectile and micro-nozzles in the inkjet printer heads are just few of them. Among the products on the market, the fluidic-MEMS has a 5 to 10 % market share, and it is growing substantially each year. The main applications of microfluidic systems are found in health science (miniaturized fluid handling), TAS (micro total analysis systems), micro-pneumatics, micromixers, micro-cooling, biotechnology (microPCR-Polymerase Chain Reaction), drug discovery and in many other applications. One of the crucial components of such products is the microchannels which connect different parts of microfluidic system. The microchannels can be used as connectors between reservoirs and reaction space or separation columns for several different types of chromatography, or heat pipes for micro cooling applications.

There are different techniques to construct microchannels with different sizes for micro-fluidic applications. Among micro fabrication techniques, the bulk micromachining is the processing of etching the substrate so that wide and bigger size open channels are fabricated [7,12]. In the bulk micromachining, the closed microchannels are also obtained by means of anodic bonding of two substrates. The main disadvantages are the quality of bonding and alignment of microchannels. But, it is easily integrated with glass substrates to form 3-D micro-fluidic devices. However, there are some new methods developed recently to overcome drawbacks of the bulk micromachining [13]. The need of an easy integration of electronics with micro-fluidic devices requires the use surface micromachining. The surface of micromachining is the processing of sequence of deposition and etching steps [6,14,15]. On the other hand, the limit on the size of channels makes it

gövde ve yüzey mikro-işleme tekniklerinin beraber kullanımı, veya yeni geliştirilen teknolojiler (LIGA, MIMIC veya polimer mikro-işleme) mikroakışkan sistemleri üretmek için kullanılır. Bu makalede, üretim teknolojilerin detaylı bir şekilde verilmesi yerine, özellikle mikrokanal üretiminde kullanılan teknolojiler örneklerle detaylandırılıp anlatılacaktır ve böylece, ilgili teknikler makale içinde verilecektir.

Silisyum Gövde Mikroişleme

Silisyum gövde işleme mikrosistem üretiminde kullanılan ilk MEMS üretim teknolojisidir [4,7,12] ve silisyum, cam ve diğer yalıtkan altlıklara uyarlanabilir. Bunun yanında, yüzeyde fazla alan kullanılması ve kapalı kanal oluşturmak için fazladan üretim adımlarının olması gövde mikroişlemenin dezavantajlarıdır. Anodik bağlama yöntemiyle kapatılan kanalların ara yüzeylerinde boşluk oluşma ve hizalama sorunları vardır. Fakat, yeni geliştirilen gömülü kanal teknolojisi (BCT), bu sorunların üstesinden gelmesinin yanında, silisyum pulunun üst yüzeyinin başka mikrosistemlerin üretimi için kullanılır kılmaktadır [13,16]. BCT teknolojisi on adımdan oluşmaktadır, sırasıyla; litografik yüzey şekillendirmesi, silisyum plakasında derin siper aşındırma, siperin yan duvarlarına uygun malzemenin kaplanması ve tabanındaki malzemenin kazınmasıdır, silisyumun gövde içinde aşındırılması, son olarakta kanalın temizlenip, kapatılmasıdır. Üretim yöntemi silisyum plakasının içinde oluşturulan kanal profilini aşındırma kimyasalına bağlı olarak değiştirmeyi ve kanalın merkezinin yüzeye uzaklığını siperin derinliğiyle belirleme imkânını verir. Siper, Derin Reaktif İyon Aşındırma (DRIE) yöntemiyle SF_6 gazı kullanılarak oluşturulur. Farklı geometrik kanal profilleri Şekil 1'de gösterildiği gibi farklı kimyasallar kullanılarak kazıma sonrasında elde edilir.

Şekil 1'deki birinci profil, silisyum gövdesi içinde yarı-küresel bir kanaldır, bunu reaktif iyon aşındırma yönteminin SF_6 gazı kullanarak, veya $HF-HNO_3$ solüsyonuyla ıslak aşındırma yöntemiyle veya

undesirable for some applications. To overcome problems associated with the previous methods, the hybrid approach, use of bulk and surface micromachining at the same time, or newly developed technologies (polymer micromachining, LIGA and MIMIC etc) are utilized to satisfy the need for micro-fluidic MEMS. In this article, the fabrication techniques will not be explained in details, but the fabrication methods used in constructing of microchannels for micro-fluidic systems will be introduced with many examples so that the review of such methods will be presented.

Silicon Bulk Micromachining

The bulk micromachining is the first MEMS technology used for fabrication Microsystems [4,7,12]. It is adaptable to Si, Glass and other insulating substrates. However, it has some limitations due to the use of large substrate surface area and the need for additional steps to cover the channel to form pipes. It requires anodic bonding with other substrates to form micro pipes, but there are some misalignment and bonding quality problems in the process. However, there is a new method which utilizes bulk micromachining but it also gives possibility of using substrate surface for additional micromachining and free of assembly due to fabrication on the one surface of substrate. The process is called buried channel technology (BCT) [13,16]. The BCT is composed of ten steps, including, lithographic patterning, a deep trench etching through Si substrate, and then conformal deposition of suitable material on the sidewalls of trench and etching of it at the bottom, and etching Si in the bulk by an appropriate solution, and finally etching away the material on the sidewalls and then seal the trench. The fabrication scheme gives us to change the shape of the channel at the bottom of trench by an etchant chemistry as well as the location of center of the channel in the Si wafer is determined by the depth of the trench. The trench is defined by Deep



Şekil 1. İnce film kaplama teknolojisi ve BCT tekniği kullanılarak farklı şekillerde üretilen mikrokanaallar [1] yüzeyde yarı dairesel [2] gövdede dairesel [3] gövdede V-olukları [4] yüzeyde V-olukları [13]

Figure 1. Different Shapes of micro channels made by thin-film techniques and BCT process schemes. [1] hemi-circular at surface. [2] circular in bulk. [3] V-groove in bulk. [4] V-groove at surface. [13]

elektrokimyasal olarak HF yardımıyla üretebilirsiniz. Eğer yukarıdaki yöntemleri (izotropik aşındırma) kanal oluşturduktan sonra uygularsanız silisyum gövdesi içinde dairesel profile sahip bir kanal üretebilirsiniz, iki numaralı profilde görüldüğü gibi. Anisotropik KOH kimyasalı kullanarak aşındırmayı uygularsanız, hemen yüzeyin altında veya siperin altında V-oluklarını üretirsiniz.

Şekil 2'de elipsoid profile sahip izotropik RIE kullanılarak silisyum gövdesinde oluşturulan açık ve kapalı kanalları görebilirsiniz. Mikrokanaalların genişliği birkaç mikrometreden yüz mikrometre seviyelerinde ve derinlik ise birkaç mikrometreden on mikrometre mertebelerinde üretim akışına bağlı olarak değişmektedir. Bu tasarım esnekliği BCT teknolojisi yardımıyla silisyum plakasının gövdesinde 3 boyutlu mikrokanaal ağı oluşturmak mümkündür [13].

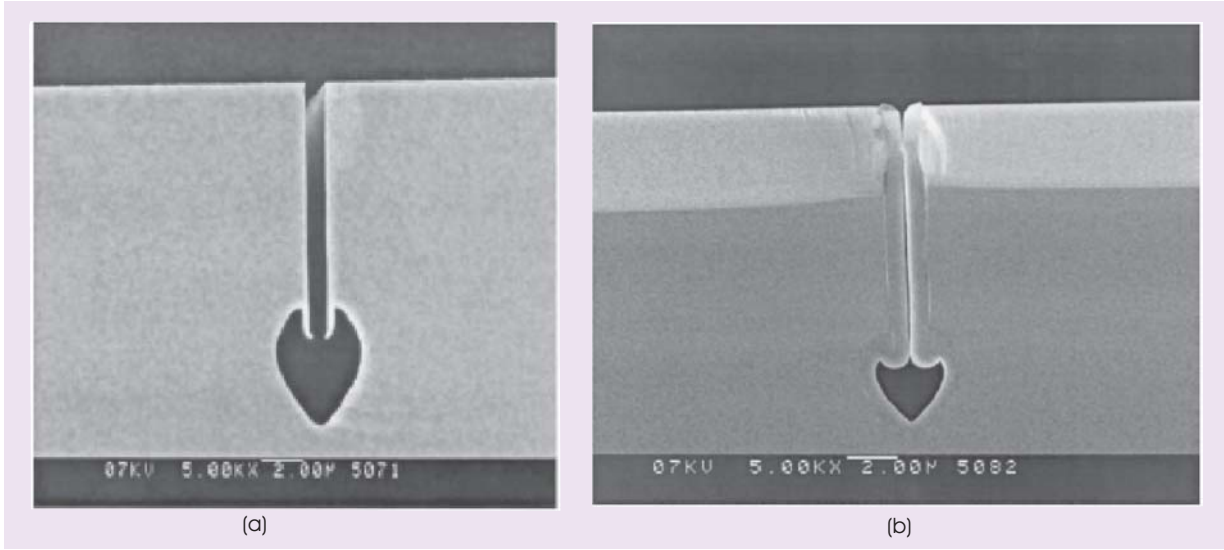
Elektronik bütünleşik devrelerde aşırı ısınmayı engellenmek için gövde mikroişleme yöntemiyle üretilmiş mikrokanaallar kullanılmaktadır [17-21]. En temel metotlardan bir tanesi, KOH izotropik aşındırmayla oluşturulan V-olukları anodik yapıştırma sonrasında kapalı kanal halinde getirilerek, 3 boyutlu olarak tasarlanıp elektronik soğutma işleminde kullanılmaktadır. DRIE yöntemiyle silisyum plakası üzerinde üretilen periyodik dikit dizileri sayesinde de ısı dağılımı homojenleştirilerek, elektronik soğutma amaçlı kullanılmıştır [20]. Bu işlemle açık kanallar, gövde mikroişleme yöntemiyle oluşturulmuş, ısı kaybı fazlasıyla artırılmıştır. Silisyum plakasının yüzeyinin (110) düzlemine sahip olması ve aşındırmanın KOH ve 2-

Reactive Ion Etch (DRIE) plasma system with SF_6 gas. The different shapes of microchannel obtained by an appropriate chemical etchants are shown in the Fig. 1.

The structure 1 in the Fig. 1 is the hemisphere channel on the sub-surface, it is obtained by isotropic etching of Si with reactive ion etching (RIE) in SF_6 gas, or etching in $HF-HNO_3$ solutions or electrochemical etching in HF solutions. If the isotropic etching is performed after trench forming, the structure 2, a bulk sphere in the Si wafer, is fabricated. The use of anisotropic etchant like KOH gives to produce V-grooves at the sub-surface or in the bulk Si depending on using it after trench forming.

In the Fig. 2, the ellipsoid microchannel in the bulk of Si wafer by isotropic RIE is shown in Fig. 2a and the sealed one is shown in Fig 2 b. The size of microchannel varies from couple of microns to 100 μm s and the depth of channel is also changing from several microns to 10s microns depending on the length of the trench. Such a design flexibility of BCT makes it possible to obtain the microchannel network underneath the Si surface [13].

To overcome excessive heat problem in the electronic components, bulk micromachined micro channels are utilized [17-21]. One common method is the fabrication of V-grooves by KOH isotropic etching on the Si surface and then use of anodic bonding to form 3-D micro channel network for electronics cooling. The development of wick patterns on the surface of Si wafer is also utilized by DRIE to evenly distribute heat dissipation [20]. In this method, there is a formation of open microchannel network by bulk micromachining, so that the improved heat dissipation is achieved. It is also possible to fabricate vertical U-shaped micro channels by wet etching chemistry based on KOH, water and 2-propanol on the (110) Si wafer [17]. The anisotropic etching characteristics of the crystalline surfaces ensure

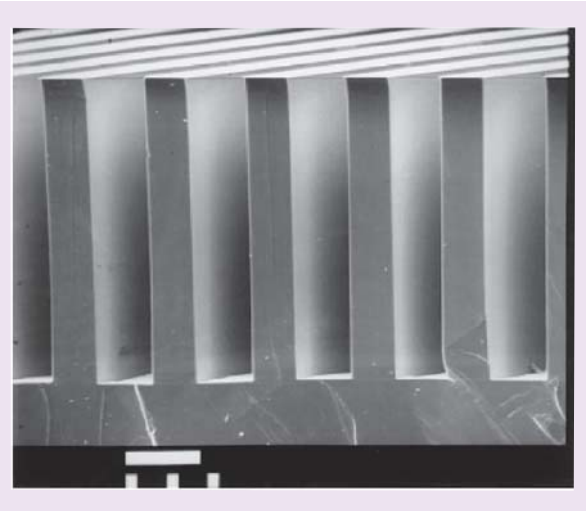


Şekil 2. (a) Silisyum plakasının gövdesinde aşındırılmış bir mikrokanal (b) Si_3Ni_4 ile kapatılmış mikro kanal [2]
Figure 2. (a) The micro channel etched in the bulk Si, (b) sealed microchannel by Si_3Ni_4 [2]

proponal kullanılarak yapılması halinde U-şekilli dik kenarlı derin siperler elde edilir [17]. Uygun aşındırma koşullarında, silisyum kristalinin aşındırma karakteristiklerinden dolayı dik ve pürüzsüz yüzeyler elde edilir. Şekil 3'te görüldüğü üzere, 400 μm derinliğe sahip, açık mikrokanallar üretilmiştir, bu kanallar anodik bağlama yöntemiyle kapatılabilir. V-olukları TMAH kimyasal solüsyonu kullanılarak tam anlamıyla tümleşik devre üretimine uyumlu olarak üretilebilir [22]. İlk olarak silisyum plakasının ön yüzünde bütünleşik devre veya mikrosistemler üretilir, diğer yüzeyde gövde mikroişleme tekniği kullanılarak V-olukları oluşturulur. Yüzeyi 1 μm silisyum nitrad kaplı ikinci bir silisyum plakası, V-oluklarının üzerine füzyon bağlama yöntemiyle yapıştırılır. İkinci silisyum plakası silisyum nitrad ince film katmanına kadar aşındırılır. Böylece, entegre devrenin altında, kapalı mikrokanalların oluşmasıyla mikro-ısı kanallarının üretilmesi gerçekleşir.

Başka yeni bir metotta, mikrokanallar iki-adımlı bir elektro-kimyasal aşındırma yöntemiyle silisyum gövdesinde oluşturulur [21]. Bu metot silisyum gövde mikroişleme teknolojisinin özelliklerini içermekle beraber daha avantajlıdır. Üretim işlemi entegre devre

to get vertical walls and flat surfaces at the optimum wet etching conditions. As seen in Fig. 3, 400 μm deep microchannel is seen and the micro structure can be sealed by glass by means of anodic bonding to form closed channels. The V-Grooves etched by TMAH solution are also fabricated by a fully IC compatible processing [22]. In the first step, IC or/and other microsystems are fabricated on the surface of Si wafer, and then the V-grooves are formed by bulk



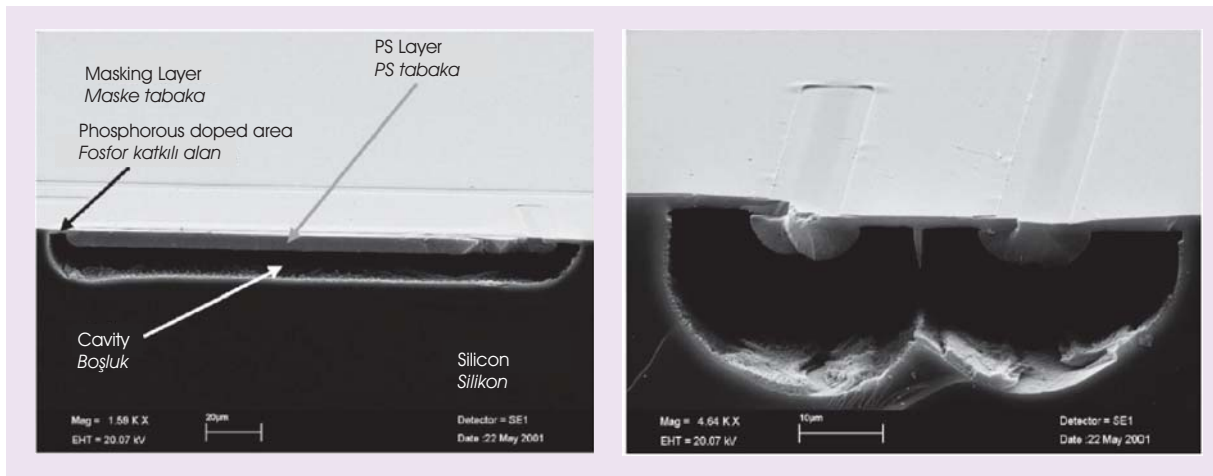
Şekil 3. Islak aşındırmayla oluşturulan dik U mikro kanallar [17]
Figure 3. The vertical U-shaped micro channels by wet etching [17]

teknolojisine uyumludur ve silisyum plakası üzerinde düz bir yüzey oluşturur, böylece daha farklı mikrosistemlerin üretilmesi mümkündür. İlk adımda, maske kullanılarak, HF:Etanol solüsyonunda silisyum plakası üzerinde elektro-kimyasal olarak nano-kristal gözenekli silisyum oluşturulur. İkinci adım olarak, anodik akım değerini değiştirilerek, gözenekli silisyumun altında tercihen aşındırma yapılır, bu bir boşluğun oluşmasını sağlar. Şekil 4a ve b'de görüldüğü gibi, aslı duran gözenekli nano-kristal silisyum katmanının mekanik dayanıklılığı, fosfor katkılı alan ve üretim tasarımından dolayı yeterince yüksek, bu yüzden kopma veya ayrışma diye bir sorun yoktur. Kanalın genişliği ve derinliği elektro-kimyasal işlemin parametrelerine bağlı olarak 100 μm ve 10 μm mertebelerindedir.

Ters mikrokanaallar aynı zamanda gövde mikroişleme ve anodik bağlama yöntemlerini kullanılarak oluşturulabilir [16]. Öncelikle kanalın profilinde istenen geometrik şekil, dairesel, yarı-dairesel veya V-olukları biçiminde, farklı kimyasallar kullanılarak elde edilir. Oluşturulan şekilli yüzeyin üstüne silisyum nitrad kaplanarak, cam plaka yüzeye yapıştırılır. Silisyum plakası kazındıktan sonra, cam üzerinde 100 nm kalınlığa sahip silisyum nitrad kanallar üretilir. Bu şekilde yalıtkan malzemeden üretilen mikrokanaallar özellikle

micromachining at the other side of the wafer. A low-stress silicon nitride is deposited on another Si wafer which is bonded to cover V-grooves by fusion bonding. The second Si wafer is etched up to silicon nitride so that V-grooves are capped by 1 μm silicon nitride. Thus, the micro heat pipe system under the electronic circuitry is fabricated by this method.

The other novel method is the buried channel processing in which the microchannel is formed by a two-step electrochemical etching of Si [21]. It has the features of bulk micro machining with some additional benefits. The process is IC compatible and it leaves a flat surface on which fabrication of IC and/or other microsystems are possible. In the first step, the formation of nano-crystalline porous silicon (PS) is formed by relevant electrochemical anodization of Si in a HF:Ethanol through a masking layer. With the change of anodization current density, it is possible to obtain preferentially electropolishing of Si which is a cavity underneath. As seen in the Fig. 4a and b, the mechanical stability of suspended PS is high enough that there is no risk of collapsing since phosphorous doped area and design of fabrication prevents any risk of detachment. The width and depth of microchannels is dependent of electropolishing



Şekil 4. İki adımlı elektrokimyasal aşındırmayla üretilen (a) dikdörtgen ve (b) ikiz yarım-daire mikrokanaallar [21]
Figure 4. The rectangular (a) and double-half-circular micro channel by two-step electrochemical etching of si [21]

elektrophoresis uygulamalarında ve optik karakterizasyon açısından önemlidir.

Silisyum Yüzey Mikroişleme

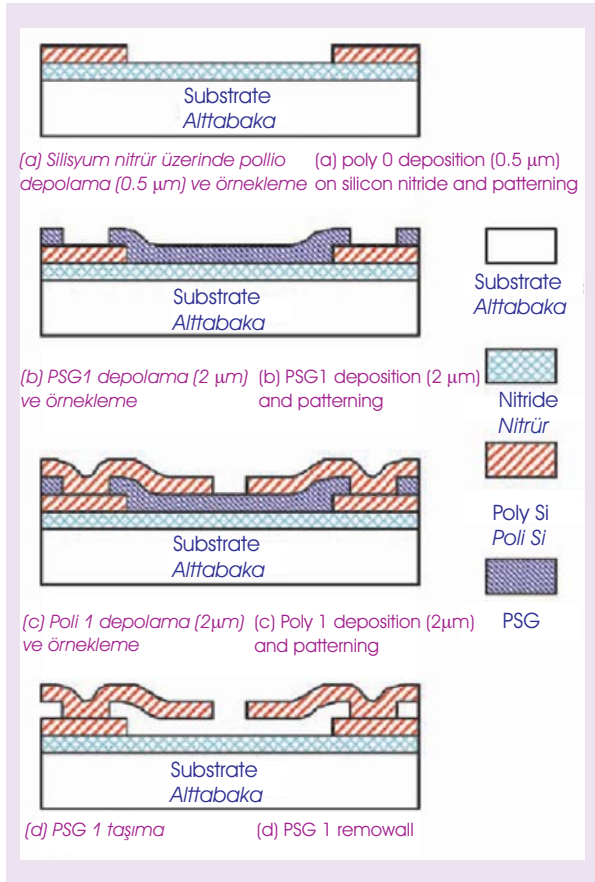
Mikrokanalları üretmek için kullanılan diğer önemli teknoloji silisyum yüzey mikroişlemedir [15]. Son yirmibeş yıldır, kapasitif mikro-hızölçerleri, mikroaynaları, RF MEMS'leri ve daha birçok mikrosistem sistemlerini üretme de kullanılmıştır. Mikroakışkan uygulamalarına yönelik mikrokanallar Si-yüzey mikroişleme yöntemiyle başarıyla üretilmişlerdir. Temelde Poli-Si yapısal malzeme olarak ve Silisyum oksit heba malzemesi olarak kullanılır. Üretim süreci birbirini takip eden kaplama ve aşındırma adımlarından oluşur. Aşındırma heba malzemesi üzerinde seçici bir şekilde tasarımın kısıtları içinde

process parameters, they can be as high as 100 μ and 10 μ , respectively.

The inverted microchannels can be also fabricated by combination of bulk micromachining and anodic bonding [16]. The desired shape of micro channel first is defined in the silicon wafer by an appropriate etching chemistry so that circular, semi-circular or triangular geometries are developed. And then, the surface is conformally coated by silicon nitride and it is bonded to glass plate. After removing Si wafer, there are 100 nm thick-wall Si_3N_4 channels on the surface of glass. It is particularly important for electrophoresis applications in which there is a need for micro channels made of insulating material. This design of insulating microchannel fabrication ensures to utilize optical detection methods.

SILICON SURFACE MICROMACHINING

Another potent technology for fabricating micro channels is the Si Surface Micromachining [15]. It has been used for the last 25 years in the microsystem fabrication to produce capacitive microaccelerometers, micromirrors, RF MEMS and so many other microsystems structures. Microchannels are also successfully developed for micro-fluidic applications by surface micro machining. The poly-Si and Si-based oxide are commonly used as structural and sacrificial materials, respectively. The main purpose is the sequential deposition and then selective etching of the materials. The etching processing is performed on the sacrificial material which is determined by the design of microstructure. There is no restriction on the choice material, but people tend to use well characterized and processed materials in their fabrication due to importance of yield and repeatability of production. Therefore, there are some standard Si micromachining processes like MUMPS (Multi User MEMS Process) by which it is possible to



Şekil 5. MUMPS kullanılarak Poli-Si mikrokanalların üretim akışı [23]
Figure 5. The fabrication of Poly-Si microchannels by MUMPS [23]

gerçeklenir. Teoride, kullanılan malzemede bir kısıt olmamasına rağmen, üretim için denenmiş ve iyi karakterize edilmiş malzemeler verim ve tekrar edilebilirlik açısından tercih edilirler. Bu yüzden standart üretim süreçlerinden olan MUMPS teknolojisi yüksek verimle üretim yapma olanağı sunduğundan, tercih edilmektedir. MUMPS teknolojisinde, heba malzemesi olarak Poli-Si, Fosfosilikat cam (PSG) veya silisyum nitrad kullanma seçeneği olduğundan, tasarıma bağlı olarak, mikrokanaallar, PSG veya Poli-Si yapı malzemesinden yapılabilir [23]. Şekil.5'te Poli-Si yapısal malzemesi kullanılarak üretilen mikrokanaalların fabrikasyon süreci şematik olarak gösterilmiştir. İlk önce, Silisyum Nitrad yalıtkan malzemesi olarak kaplanmış, birinci seviye Poli-Si kaplanarak şekillendirilmiştir. Kaplanan Poli-Si kalınlığı sadece, standart üretim hattı olduğu için, 2 mikrondur. Daha sonra, 0.75 mikron kalınlığında PSG kaplanmıştır, bu malzeme heba malzemesi olarak kullanılacaktır, dolayısıyla mikrokanaalın iç hacmini oluşturacaktır. Daha sonra ikinci Poli-Si kaplanarak, aşındırma için gerekli olan delik oluşturacak şekilde, fotolitografiyle şekillendirilecektir. Heba malzemesi olan PSG, HF banyosunda delik yardımıyla kazınacak, sonrasında yapı yıkanıp kurutulacaktır. Buradaki en temel sorun, mikrokanaalın boyutları MUMPS tarafından belirlenmesidir. Fakat, MUMPS yüksek verimde çoklu üretim imkanını tanıdığından avantajlı bir yönü vardır. PSG'den üretilmiş $70\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ ebatında, ve Poli-Si oluşan $70\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ kesit boyutlarına sahip prototipler başarıyla üretilmiştir. Aşındırma için kullanılan delik üretim süreci sonunda kapatılmasa bile, mikron boyutlarında akışkanlarda (su ve kan) oluşan yüzey gerilimi herhangi bir olası sızıntıyı engellemiştir.

Silisyum yüzey mikroişlemede mikrokanaal üretimi geliştirilen başka bir teknoloji kaldırmadır (lift-off). Gözenekli-Silisyum kaldırma teknolojiyle beraber kullanıldığında 3 boyutlu mikrokanaallar üretmek mümkündür [24]. Bu yöntemin en önemli avantajları çok basit olması ve silisyum pulu üzerinde gayet düzgün bir

manufacture microchannels with a high yield. In the MUMPS, the Poly-Si, Phosphosilicate Glass (PSG) and silicon nitride are deposited and etched away in a defined manner, so that microchannels are made of by PSG or Poly-Si depending on the design [23]. In the Fig.5, the schematic of a processing sequence is presented for the Poly Si-based micro channel fabrication. First, Si_3N_4 is deposited as an insulating material, and then first level of Poly-Si is deposited and patterned to increase the depth of micro channel. The thickness of deposited Poly-Si in the MUMPS is only 2 microns since it is a standard processing. Then, 0.75 μm -thick PSG is deposited and patterned, it is the inner volume of microchannel. On top of that, the second 2 μm -thick Poly-Si is deposited and an etch hole is patterned on top of it. The second Poly-Si later forms the top surface of channel. The sacrificial PSG is removed by HF solution via the etch hole and then the structure is rinsed and dried. The main disadvantage is the size of micro channel which is limited by the MUMPS technology. However, the MUMPS gives us highly repeatable and reliable processing as it is very critical for mass production. The prototype glass microchannel with a cross section of $70\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ and the polysilicon micro channel with a cross section of $70\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ are successfully manufactured. Although the etching holes are not sealed at the end of the processing, there is no any risk of leakage for the working fluids (blood and water) in the micro channels due to high surface tension at the etching holes.

The other important processing in the surface micromachining is the lift-off technique to create microchannels on the surface of the Si wafer. The porous-Si coupled with lift-off processing is used to fabricate 3-D micro channel network [24]. The advantages of the processing are being simple and leaving very flat surface on top of the micro channels so that it is possible to introduce IC or/and integrated

yüzey oluşturmaları, böylelikle tümleşik devre üretimi veya başka bir mikrosistem geliştirilmesi olasıdır. Buna ek olarak, gözenekli-Si kazıma ileten bir altlık gerektiren elektrokimyasal kazıma ile yapılmaz ve gözenekli-Si elektron siklotron rezonans (ECR), plazma zengin kimyasal buhar kaplama (PEVD) yöntemiyle 100 °C altında depolanır. Gözenekli Si heba malzemedir ve HF tabanlı solüsyonla aşındırılır. Düşük sıcaklıklardaki depolama ve oyma işlemi herhangi bir altlıkta hatta plastikte 3 boyutlu kanal üretimini mümkün kılar. Bu çalışmada, 100 µm genişliğe kadar ve 0.5 µm kalınlığında 3 boyutlu mikrokanalet sistemleri yapmak mümkündür, bakınız Şekil 6a. Si-yüzey mikroişlemede heba malzemesi kullanarak mikroyapıların üretimi çok uygulanan bir yöntemdir, hatta polimer sıkça heba malzemesi olarak kullanılır. Polimerlerin heba malzemesi kullanılarak üretilen mikrokanaletlerin genişliği 100 µm ve yüksekliği 10 µm seviyesindedir [25,26]. Termal çözünen bir polimer olan polikarbonatlar, heba malzemesi olarak kullanılarak mikrokanaletler üretilmiştir. Polikarbonatlar 200 - 300 °C aralığında kimyasal olarak çözünenler. Üç farklı malzeme mikrokanaletleri üretmek için kullanılır: İnorganik cam (silisyum oksit), termoplastik polimer (Avatrel dielektrik polimer) ve termoset polimer (bisbenzilsiklobutan sikloten 3022-57). Bu yöntemle 3 boyutlu bir mikrokanalet üretimi mümkün değildir, ama farklı malzeme türlerinden mikrokanalet oluşturulması olasıdır. Şekil 6b elipsoid profile sahip PECVD silisyum oksit malzemesinden oluşan 5 µm yüksekliğinde ve 25 µm genişliğinde bir mikrokanalet göstermektedir. Polynorborene malzemesi 375 ila 425 °C aralığında çözünebilir, bu yüzden silisyum nitrad ve silisyum oksit malzemelerinden mikrokanalet oluşturulmasında kullanılmaktadır. Bu yaklaşımla 10 µm yüksekliğinde ve 100 µm genişliğinde çok katlı olarak silisyum oksit ve silisyum nitrad malzemesinden mikrokanaletler üretilmiştir [27]. Bu metotta, polimerin R-grubunun değiştirilmesiyle, kanalin içi hidrofobik veya hidrofilik yapılır, bu durum kanalin içinden akan sıvının akış rejimini etkiler.

micro systems with 3-D microchannels. Moreover, etching of Porous-Si is not done by electrochemical etching which requires a conductive substrate and the porous-Si is deposited by electron cyclotron resonance (ECR) plasma enhance chemical vapor deposition (PECVD) at temperature lower than 100 °C. The porous-Si is a sacrificial material and etched away by HF-based solution. The deposition and etching processing at low temperatures makes it possible to fabricate 3-D channels on any substrate, even on plastics. In this work, the channels width up to 100 µm and height around 0.5 µm in the 3-D network are fabricated on Si wafer as seen in Fig. 6a. The use of sacrificial material in the micro-fabrication technology is very common and it is even including polymer materials. The use of polymer-based sacrificial material in the Si-surface micromachining enables to fabricate microchannels with width up to 100 µm and height up to 10 µm [25,26]. The polycarbonates as thermally decomposable sacrificial material are used for the formation of microchannels. Polycarbonates decompose in the temperature range of 200-300 °C. The three different of materials are used as a cover of microchannel: an inorganic glass (silicon dioxide), a thermoplastic polymer (Avatrel dielectric polymer) and a thermoset polymer (bisbenzoycyclobutene Cyclotene 3022-57). It is not possible to create 3-D network of microchannels but, it is an easy fabrication scheme to produce microchannels from different materials. The Fig. 6b presents the dome shape and PECVD silicon oxide based micro channels with size of 5 µm in height and 25 µm in width. The polynorborene as a sacrificial polymer material can be also used and it is decomposed thorough silicon oxide and silicon nitride capping layers at temperatures between 375 to 425°C. The micro channel made of by silicon nitride and silicon oxide with 10 µm-height and 100 µm-width are fabricated in a multilevel manner [27]. In this method, a polymer material (polynorborene

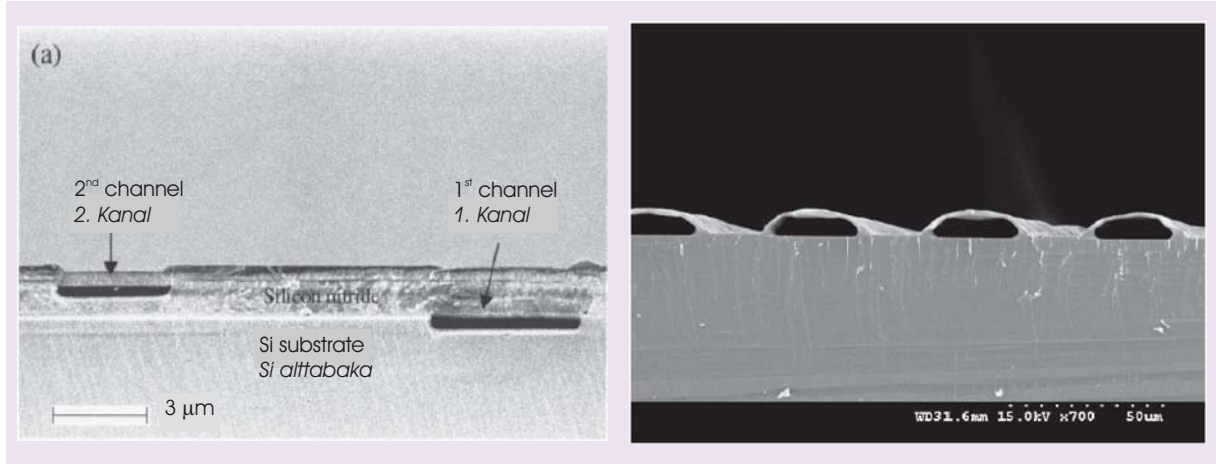
Polimerlerin özellikleri, yüzeye yapışma gibi, opsiyonlu olarak değiştirilebildiğinden polimerle çalışmak mikrokanaletiminde önemli avantajlar sağlar. Bu konu bir sonraki başlıkta daha detaylı incelenecektir.

Silisyum yüzey mikroışlemede mikrokanaletiminde oluşan boyut sıkıntısı, elektro-kaplama yöntemiyle aşılabilir [28]. 30 μm 'dan 1.5 mm genişliğe sahip, 0.5 mm'den birkaç cm uzunluğunda ve 5-100 μm yüksekliğe sahip Cr ve Altın metallerinden mikrokanaletim yapılabilir. Üretim düşük sıcaklıkta yapılmakta, bütünleşik devre teknolojisi uyumlu, silisyum plakasının aşınması söz konusu değildir ve kanalların iç çeperi isteğe bağlı olarak bir malzemeyle (yalıtkan, plastik ve metal) kaplanabilir. Üretim temel adımları Şekil 7a'da şematik olarak gösterilmiştir. İlk olarak, çekirdek Cu ve yapıştırıcı olarak kullanılan Ti kaplandıktan ve şekillendirildikten sonra, elektro-kaplama ile mikrokanaletim tabanı oluşturulur. Daha sonra 5 - 100 μm kalınlığında foto-direnç polimeri kaplanır, bu katman mikrokanaletim iç hacmini oluşturmakta heba malzemesi olarak son adımda kazanacaktır. Benzer bir elektro-kaplama yöntemiyle kanaletim yan ve üst duvarları da oluşturulur. Sonunda, kanaletim içindeki heba malzemesi olarak kullanılan polimer malzemesi uzaklaştırılarak, Şekil 7b'deki mikrokanaletim üretilir. Giriş ve çıkış kapları kanaletim üstünde veya altında silisyum gövde işleme yöntemiyle oluşturulur. Hatta, özel bir tasarımla oluşturulan mikrokanaletim havada asılı kalacak biçimde de oluşturulabilir. Başka yeni bir metotta, kalıpsız elektro-kaplama yöntemiyle dairesel mikrokanaletim üretilir [29]. Mikrokanaletimlerin çapı elektrokaplama parametrelerine bağlıdır. 40 μm çaplı dairesel mikrokanaletim başarıyla üretilmiştir.

Fosfor-katkılı cam (PSG) heba malzemesinin kullanılarak mikrokanaletim üretilmesini mikroğne sisteminde görebiliriz [30]. Aslında, mikroğnenin tamamı silisyum yüzey ve gövde mikroışleme teknolojilerinin kullanılmasıyla üretilmiştir, fakat özellikle mikrokanaletim silisyum yüzey mikroışlemeyle oluşturulmuştur [31]. Mikrokanaletim ebatı PSG ile belirlenmiştir, daha sonra bu silisyum nitrad ile kaplanmıştır. PSG heba malzemesi HF banyosunda açılan bir delik sayesinde uzaklaştırılmış, sonrasında bu

chemistry) is used as a sacrificial material and by changing R-group attached to polymer makes it possible to design inner surface of channel as being hydrophobic or hydrophilic characteristics for movement of fluid through channel. Since the materials properties of polymers i.e. adhesion to specific surfaces can be tailored, it is important to work with polymer materials to fabricate micro channels. The topic will be explained in details in the next section.

The size limitation of microchannels by surface micromachining can be extended by metal electroforming processing [28]. The microchannels of 30 μm to 1.5 mm in width, 0.5 mm to several centimeters in length, and 5-100 μm in thickness are fabricated by Cr and gold metals. The process is low-T, IC compatible and free of substrate etching as well as the inner surface of channels can be covered by any low-T deposited films (electrical insulators, plastics and metals). The main processing steps are schematically shown in Fig 7a. In the first step, the bottom wall of micro channel is fabricated by electroforming after appropriate adhesion (Ti) layer and seed layer (Cu) being patterned. And the 5-100 μm of positive photoresist is spin coated and lithographically patterned on top of the bottom wall. Next, the thick photoresist is used to precisely define the inner dimensions of the microchannel and serves as a thick sacrificial layer to be removed later in the process. The same electroforming forming procedure is followed to construct the top and side walls of micro channel. In the final step, the photoresist materials inside the channel is removed so that the structures as shown in Fig. 7b is fabricated. The input and output ports are also introduced either on the top of the channel or at the bottom from the Si wafer by bulk micromachining. It is also possible with an appropriate design to suspend the microchannels on the air. Another new method based on moldless electroplating is developed to make circular microchannels [29]. The size of the



Şekil 6. (a) gözenekli silisyum kullanılarak üretilen 3 boyutlu mikrokanallar (b) PECVD ile kaplanarak ve polietilen karbonat heba malzemesi kullanarak elde edilen mikrokanallar [25]

Figure 6. a) 3-D Network of microchannels by porous-si [24] b) polyethylene carbonate encapsulated in pecvd deposited silicon dioxide [25]

delik kapatılmıştır. Mikrokanal içinde akışkanın hareketi Poli-Si dirençleriyle balon oluşturulması sayesinde gerçekleştirilmiştir.

Polimer Mikroişleme

Yüzey ve gövde mikroişleme birçok sıralı üretim adımları içerir ve bazı adımların yapılması uzun süre gerekmektedir. Bu tip sorunları engellemek için polimerler yapısal malzeme olarak mikrokanal üretiminde kullanılır. Bu teknolojiye, Si yüzey işleme mikrosistem oluşturulmasında kullanılsa bile, polimerin şekillendirilmesi üretimin ana adımlarını oluşturur. Mikrokanal üretiminde polimerlerin kullanılmasındaki en önemli avantaj, çoklu üretime imkan tanıyan yöntemlerin kullanılabilmesidir, yani, kalıplama, baskılama, plazma aşındırma veya lazer kazıma yöntemlerini kolaylıkla polimer tabanlı mikroişleme üretiminde kullanılabilir. Polimerlerin optik geçirgenliğinin olması, yüzey özelliklerinin değiştirilebilmesi ve tasarıma bağlı olarak geliştirilebilmesi tercih edilmelerine yol açar. Bununla birlikte, yüksek iç yüzey alanına sahip farklı geometrik mikrokanal profillerin (dikdörtgen, dairesel ve yüksek derinlik oranına sahip) akışkan özelliklerinin çalışılmasında önemli avantajlar getirmektedir.

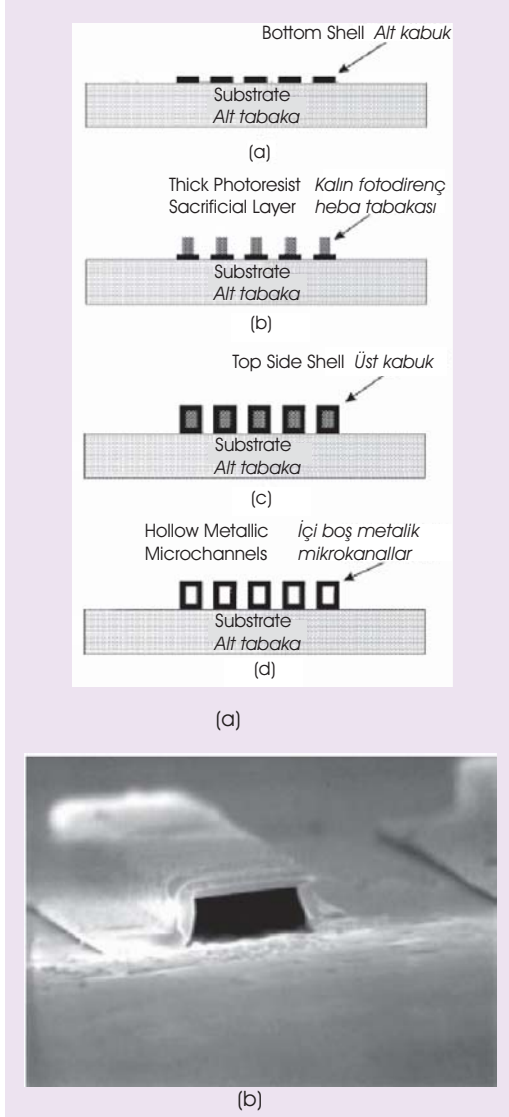
channel varies depending on the electroplating conditions. The circular channel with a diameter of 40 μm is successfully fabricated.

A sacrificial layer of phosphorus-doped glass (PSG) is used to form in the microchannel to fabricate a microneedle [30]. Actually, the whole structure is created by a combination of surface and bulk Si micromachining [31], but the channel is formed by the surface micromachining. The dimension of the channel is defined by PSG, and it is covered by Si_3N_4 . The PSG is removed by HF solution via etch hole that is closed after the etching. The fluid motion through channel is facilitated by bubble formation with use of Poly-Si resistors.

Polymer Micromachining

The surface and bulk micromachining are the processes with several sequential and time consuming steps. To overcome such concerns, polymers are employed as a base material for the fabrication of microchannels. In this technology, the Si micromachining and/or new techniques are also utilized to fabricate microsystems, but the main processing is based on the structuring the polymers. One of the most important advantages of using polymers in the microchannel fabrication is the

Kalıplama yöntemi polimer tabanlı mikroüretimde sıklıkla kullanılır [32-35], burada cam veya silisyum kalıplar polimer malzemesinde mikrokanaalların üretiminde kullanılır. Polimer tabanlı kalıplar da mikrokanal üretiminde kullanılabilir ve bu tür kalıpların esneklikleri fazla



Şekil 7. (a) Elektrokaplama ile mikrokanal üretim akışı, (b) bu metotla üretilen bir mikrokanaalın ($50 \times 20 \mu\text{m}^2$) SEM fotoğrafı. Kesit alanı $50 \times 20 \mu\text{m}^2$ ve cidar kalınlığı $8\text{-}\mu\text{m}$ dir. Yapısal malzeme olarak elektrokaplama nikel ve içi altınla kaplanmış duvarlardır [28]

Figure. 7. a) Fabrication scheme of microchannel by electroforming, b) scanning electron micrograph of a single microchannel fabricated on top of a silicon substrate. the cross-sectional dimensions are $50 \times 20 \mu\text{m}^2$ with $8\text{-}\mu\text{m}$ -thick walls. the structural material is the electroformed nickel with gold covering the inside walls [28]

suitability for mass fabrication using low-cost fabrication methods such as molding, imprinting, plasma etching or laser ablation. The other characteristics of using polymers are capability for surface modification, good optical transparency and being available for the customized material design. Moreover, the use of polymers makes it possible to obtain variety of different geometries (rectangular, circular and high aspect ratio) with high surface area that enables us to explore behavior of fluids.

One of the commonly used method in polymer-based microfabrication is molding [32-35] in which a glass or silicon based molds are used to create microchannels in the polymer materials. It is also possible to use polymer-based mold to fabricate microchannels. The ease of bending for the polymer molds make it attractive for curved applications. The polymer mold is formed as seen in the Figure 8. However, there must be glass mold to define polymer mold. The glass is first etched by a surface micromachining, then it is used to induce PMMA (polymethylmethacrylate) molds. The PMMA replica masters from the original glass master are formed by thermal printing [32]. The channels with $100 \mu\text{m}$ in width and $25 \mu\text{m}$ in depth are successfully fabricated from PDMS.

The microchannel fabrication based on PMMA and Polycarbonate (PC) is also possible by hot embossing in which the mold (glass or Si) is brought in contact with thermoplastic polymer at above glass transition temperature (TG) [32]. But, the difference in coefficient of thermal expansion between polymer and mold materials may cause peeling of the

olduğundan eğimli yüzeylerde de uygulanabilir. Şekil 8, bir polimer kalıbın üretilmesini göstermektedir. Fakat, polimer kalıbı oluştururken cam kalıbın kullanılması gerekir. Cam önce yüzey mikroisleme yöntemiyle şekillendirilir, sonra oluşan kalıp PMMA (Polimetil metakrilat) kalıbının oluşturulmasında kullanılır. PMMA kalıp mastırları termal baskılama yöntemiyle elde edilir [32]. Bu yöntem kullanılarak, genişliği 100 µm ve derinliği 25 µm olan PDMS mikrokanaalları başarıyla üretilmiştir.

Polikarbonatlar (PC) ve PMMA polimer malzemeleriyle sıcak presleme yöntemiyle mikrokanaallar üretilir. Bu üretim sürecinde termoplastik olan polimer camı geçiş sıcaklığının (cam sıcaklığı) üzerinde ısıtarak kalıpla (cam ve silisyum) şekillendirilir [32]. Fakat, kalıpla malzemenin ısı genleşme katsayılarındaki fark termal gerilme oluşturur, bu durum mikroyapının ayrışmasına sebep olabilir. Yükseklik oranının 19 olduğu yapılar gerçekleştirilmiştir. Kalıbın ısınmasıyla ortaya çıkan problemleri ortadan kaldırmak için, kalıbın hava püskürtme yöntemiyle ayrıştırılmasını sağlayan yeni bir metotla, mikrokanaallar oda sıcaklığında üretilir [36]. Bu durum, kalıbın kullanılması 10 kat artırmış, dolayısıyla maliyet azalmıştır. PDMS kalıplar kullanılarak cam-tabanlı mikro-akışkan sistemler (kanallar) üretilir. Polimerlerin kullanılmayacağı durumlarda, hem maliyet hem de hızlı üretim sağladığından, PDMS tabanlı kalıplar geliştirilerek, cam plakaların üzerinde mikrokanaallar üretilmiştir [37].

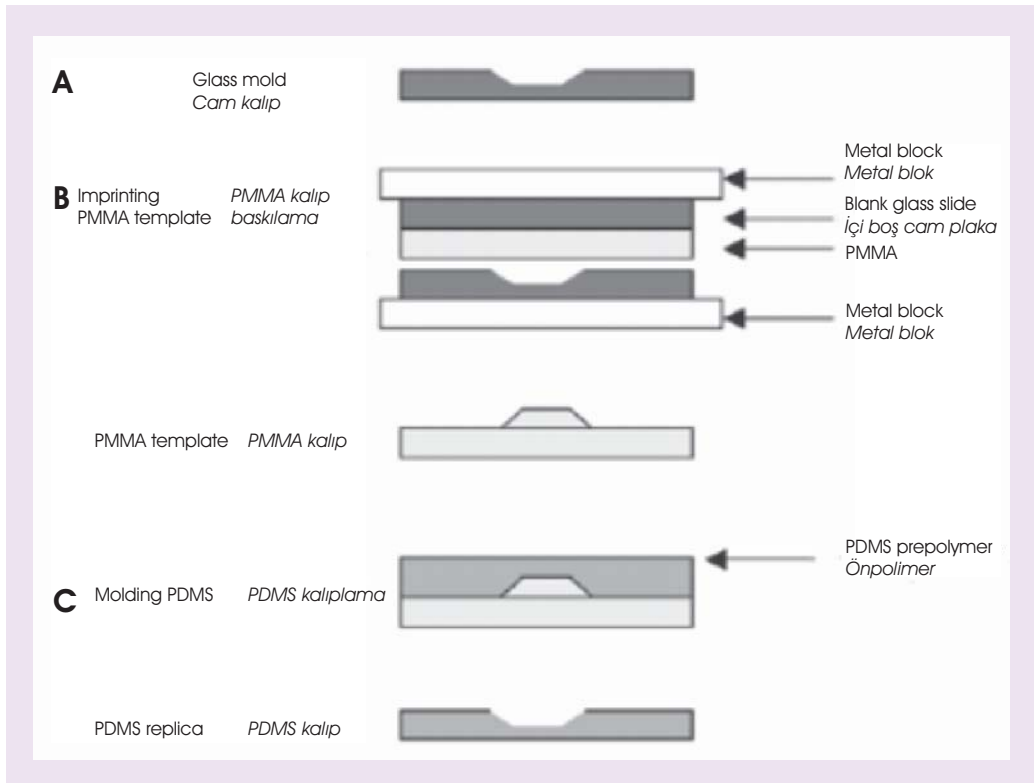
SU-8 polimerinin yapısal malzeme olarak kullanılmasıyla 3 boyutlu mikrokanaallar üretmek mümkündür [38,39]. Çalışmaların bir tanesinde, kanal içi 3 boyutlu mikroağ oluşumu geleneksel litografiyle yapılmıştır. SU-8 polimeriyle dolu olan metal mikrokanaalların olduğu ve bu kanalların farklı açılardan plakanın öbür tarafından UV ışınıyla farklı dozajların etkisine bırakıldığında, istenen boyutlarda mikroağların oluşması sağlanmıştır [38]. Üretilen mikroağlarla mikron total analiz sistemleri geliştirilmiştir. Tam dairesel mikro kanallar SU-8 mikro işlemeye bağlı olarak gerçekleştirilir. Optik fiberler sıralı olarak SU-8 polimerinin içine yerleştirildikten sonra, optik fiber HF banyosunda kazınırsa, ortaya 3 boyutlu dairesel polimer malzemesinde

structure due to thermally induced stresses. The aspect ratio as high as 19 is realized. Another method to obviate the heating of molds during thermal imprinting is to remove mold by blasting air so that the polymer is released from the mold at room temperature [36]. The use of mold is increased by ten and consequently the cost of fabrication is reduced dramatically. It is even possible to fabricate glass-based microfluidic devices by using PDMS molds. When the organic molecules or solvents are used or when the conditions are extreme, the use of polymer-based microfluidic structures is not desirable, thus a rapid prototyping technique by PDMS mold to fabricate glass-based microfluidic systems is developed for applications which speed and cost of production are very critical [37].

3-D network of microchannel fabrication is done by using SU-8 polymer as a structural material [38,39]. In one of the studies, the fabrication of in-channel three-dimensional micromesh is achieved by the conventional lithography. The micromesh is realized by exposing UV light from backside of the SU-8 coated metal-patterned glass substrates for different angles so that shape and size of the micromesh is obtained by numbers of exposure and irradiation angle [38]. Microfilters were successfully fabricated for the application of micro total analysis system. Full circular micro channels are realized based on SU-8 micromachining [39]. The optical fibers are embedded into to SU-8 polymer in a sequential manner, and after etching optical fiber by HF, it is possible to achieve 3-D network of circular micro channels by a polymer SU-8 material. Fig. 9 presents the fabrication scheme of

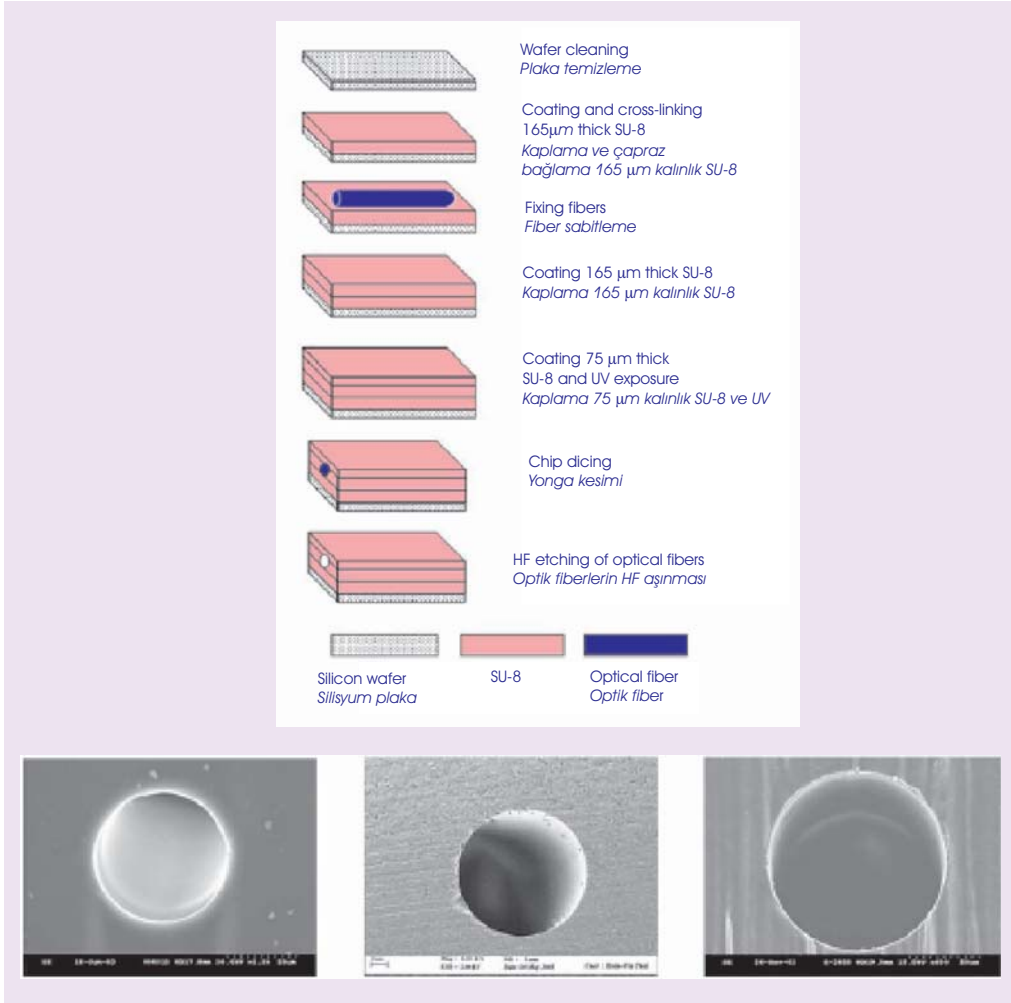
yapılmış mikrokanal açığını oluşturabilirsiniz, üretimin adımları Şekil 9'da gösterilmiştir. İki boyutta şekil verilmiş 100 µm kalınlığında PDMS katmanlarını kullanarak, 3-Boyutlu mikroakışkan sistemleri yapılabilir [40]. Katmanların yüzeyleri plazma ile aktif hale getirildikten sonra bir kalın plaka üzerine yerleştirilerek mekanik olarak yapıştırılırlar. Negatif foto-direnç polimerin UV veya X-ışını altında çapraz bağlarının artması sonucu yapısal malzeye dönüşmesini ve heba malzemesi olarak pozitif foto-direnç polimerinin şekillendirilmesiyle, tamamen polimer tabanlı bir mikrokanal üretimi gerçekleştirilebilir [41]. İlk olarak 0.5 - 0.2 nm dalga boyuna sahip bir X-ışını litografisiyle bir pozitif foto-direnç polimeri, PMMA, silisyum plakası üzerinde şekillenir. Bunun üzerine başka bir negatif foto-direnç polimeri olan SU-8 dökülür. Mikrokanalların giriş ve çıkış kapıları KOH banyosunda silisyum plakası üzerinde açılır ve

circular microchannel and some examples of them. Multi-layer micro fluidic system is constructed by complex 3-D channel paths based on the stacking of thin (100 µm) 2-D patterned PDMS layers [40]. The layers are placed on a thick substrate and bonded by either mechanical force or self bonding after treated surfaces of layers by oxygen plasma. By means of UV or X-ray lithography on the positive photoresist, complex 3-D microchannels are also fabricated from cross-linked negative photoresist [41]. First, positive resist, PMMA, is patterned on Si substrate by a soft X-ray lithography with a wavelength of 0.5-0.2 nm, and then positive resist, SU-8, is poured onto the substrate and sealed by a glass layer. The Si is etched for the inlet and outlet by KOH and



Şekil 8. PDMS mikroakışkan sisteminin üretim akışı: (A) Negatif cam mastırın aşındırılması, (B) Cam mastırın kullanılarak PMMA replikasının üretimi, böylece pozitif bir PMMA kalıbı elde edilmiştir, (C) PMMA replikasını kullanarak PDMS mikrokanalın üretimi, PDMS şekli PMMA kalıbından sıyrılarak uzaklaştırılır. [33]

Figure 8. Fabrication of PDMS microfluidic systems: (A) Wet-etched original glass negative master; (B) Imprinting PMMA replica master against the glass master and obtained pmma replica master with positive surface Relief; (C) casting pdms against the PMMA replica master and peeling the cured pdms replica off from the PMMA replica master. [33]



Şekil 9. (a) Üretim adımları, (b) 36, 80 ve 125 µm çaplı dairesel mikrokanalların SEM fotoğrafları [39]
Figure 9. (a) The fabrication process, (b) SEM photographs of micro channels with different diameters of 36, 80 and 125 µms [39]

sonra bu delikler aracılığıyla PMMA aseton yardımıyla uzaklaştırılır, böylelikle bir polimeri heba malzemesi olarak kullanarak, başka bir polimerden çok ucuz ve hızlı bir şekilde akışkan mikrosistemi gerçekleştirilmiş olur. 50 mikron genişliğe sahip mikrokannallar X-ışınları kaynağı kullanılarak başarıyla üretilir, fakat X-ışınlarının litografide kullanımı üretim maliyetini artırmaktadır.

SONUÇ

Mikrokannallar mikroakışkan sistemlerinin temel unsurlarıdır. Bunları üretmek için birçok farklı yöntem vardır. Üretimin seçimi uygulamaya ve sistemin karmaşıklığına bağlıdır. Polimerlerin mikro-akışkan sistemlerin üretiminde kullanılması

then PMMA is etched away by acetone. The micro channels with 50 µm in width are successfully fabricated but the use of X-ray source for the lithography increases the cost of fabrication.

CONCLUSION

The microchannels are the essential part of micro-fluidic systems. There are several ways of fabricating them. The choice of fabrication method depends on the application and complexity of the system. The use of polymer as a structural material increases the degree of freedom on the use of fluidic-MEMS, but the CMOS

belli bazı yönlerden avantajlı ve esneklik kazandırabilir, fakat bütünleşik devre entegrasyonu ve üretimde yüksek verimi yakalama endişesi gibi durumlar mikrokanal üretim metodunun seçiminde belirleyici olabilir. Eğer kullanılan üretim yöntemi kolaylıkla çoklu üretime adapte edilebilir değilse, laboratuvar ortamında yapılan başarılı mikrokanal çalışmalarının ticarileştirilmesinde önemli sorunlar ortaya çıkar. Bu yüzden, mikrosistem tasarımının daha ilk günlerinde hangi tür üretim metodunu seçeceğinizi belirtmelisiniz. Makalede bütün olası üretim teknikleri alan darlığından anlatılmasada, mikrokanal üretiminde kullanılan en önemli teknolojiler örneklerle verilmiştir. Yukarıda, silisyum yüzey ve gövde mikroişlemeyle beraber polimer mikroişleme ayrı başlıklar olarak verildi. Fakat, üretimde tek bir yöntem kullanılmaktansa, farklı yöntemlerin en optimum şekilde

integration and high yield concerns will be main determinant on the choice of fabrication method if the fluidic microsystem is to be IC compatible. There is a clear barrier for transforming a successful device developed in the lab to market, if the fabrication technology is not easily scaled to mass fabrication. Thus, it is very critical to decide the technology of fabrication at the very early design of fluidic microsystems. Not all fabrication alternatives are given in the text, but the common ones are explained with examples. Si-based surface/bulk and polymer-based micromachining are detailed above, however the micro-fluidic devices are commonly fabricated by the combination of different methods.

KAYNAKÇA / REFERENCE

1. MEMS/NEMS Devices and Application, Chapter 8, Springer Handbook of NanoTechnology Edited by B. Bhushan (2004)
2. **D J Bell, T J Lu, N A Fleck and S M Spearing**, "MEMS Actuators and Sensors: Observations on Their Performance and Selection for Purpose", J. Micromech. Microeng. Vol. 15, pg.153 (2005)
3. **Senturia, S.D.**, Microsystem Design, Kluwer Academic Publishers (2000)
4. **Maluf, N**, Introduction to Microelectromechanical System Engineering, Artech House, Inc (2000)
5. **Zhang, G.**, Design and Simulation of a CMOS-MEMS Accelerometer, Carnegie Mellon Universty, M.S. Thesis (1998)
6. **Koester, D., Cowen, A., Mahadevan, R., Stonefield, M. and Hardy, B.**, PoyMUMPS Design Handbook, Revision 10.0, MEMSCAP (2003)
7. MultiMEMS Microsystems Manufacturing Cluster., MultiMEMS Process, Design Handbook, Version 3.0, Part IIIa: Design Introduction, MultiMEMS (2003)
8. Materials Aspect of Micro- and Nanoelectromechanical System, Chapter 7, Springer Handbook of NanoTechnology (2004)
9. **Spearing S.M.**, "Materials issues in Microelectromechanical (MEMS)", Acta Mater. Vol. 48, p. 179 (2000)
10. **O. Rotting, W. Ropke, H. Becker, C. Gartner**, Polymer Microfabrication Technologies, Microsystem Technologies Vol. 8, p. 32 (2002)
11. **R. Ruprecht, T. Hanemann, V. Ploffer, J. Hausseil**, Polymer Materials for Microsystem Technologies, Microsystem Technologies Vol. 5, p. 44 (1998)
12. **Kovacs, G.T.A., Maluf, N.I. and Petersen, K.E.**, Bulk Micromachining of Silicon, Invited Paper, Proceedings of the IEEE, Vol. 86, no.8, pp. 1536 (1998.)
13. **M. De Boer, R.W. Tjerkstra, J.W. Berenschot, H.V. Jansen, G. J. Burger, J. G. E. Gardeniers, M. Elwenspoek, and A. van den Berg**, Micromachining of Buried Micro Channels in Silicon, J. MEMS IEEE, V. 9, No. 1, (2000)
14. **Boser, B.E. and Howe, R.T.**, Surface Micromachined Accelerometers, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 31, no.3, pp. 366 (1996)
15. **J.M. Bustillo, R.T. Howe, and R.S. Muller**, Surface Micromachining for Microelectromechanical Systems, Proceedings of the IEEE, V. 86, No. 8, p. 1552 (1998)
16. **R.W. Tjerkstra, M. de Boer, E. Berenschot, J.G.E. Gardeniers, A van den Berg, M. Elwenspoek**, Etching Technologies for Microchannels, The Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems: An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots Proceedings, IEEE, p. 147 (1997)

17. **V.K. Dwivedi, R. Gopal, and S. Ahmad**, Fabrication of very Smooth Walls and Bottoms of Silicon Microchannels for heat dissipation of semiconductor devices, *Microelectronics Journal* V. 31, p. 405 (2000)
18. **S. Launay, V. Sartre, M. Lallemand**, Experimental study on Silicon Micro-Heat Pipe Arrays, *Applied Thermal Engineering* V. 24 p. 233 (2004)
19. **S.-W. Kang, S.-H. Tsai, H.-C. Chen**, Fabrication and Test of Radial Grooved Micro Heat Pipes, *Applied Thermal Engineering* V. 22 p.1559 (2002)
20. **D. A. Benson, R. T. Mitchell, M. R. Tuck, D. R. Adkins, and D. W. Palmer**, Micro-Machined Heat Pipes in Silicon MCM Substrates, *Proceedings of IEEE*, p. 127, (1996)
21. **G. Kaltsas, D. N. Pagonis, and A. G. Nassiopoulou**, Planar CMOS Compatible Process for the Fabrication of Buried Microchannels in Silicon, Using Porous-Silicon Technology, *IEEE Journal of MEMS*, V. 12, No 6, p. 863 (2003)
22. **M. Lee, M. Wong and Y. Zohar**, Design, Fabrication and Characterization of an Integrated Micro Heat Pipe, *Proceedings of IEEE*, p. 82 (2002)
23. **K.B. Lee, L. Lin**, Surface Micromachined Glass and Polysilicon Microchannels Using MUMPs for BioMEMS Applications, *Sensors and Actuators A* V. 111 p.44 (2004)
24. **W.J. Nam, S. Bae, A.K. Kalkan, and S.J. Fonash**, Nano- and Microchannel Fabrication Using Column-void Network Deposited Silicon, *J. Vac. Sci. Technol. A* V.19.No:4. (2001)
25. **H.A. Reed, C.E. White, V. Rao, S.A. Bidstrup Allen, C. L. Henderson and P.A. Kohl**, Fabrication of microchannels using polycarbonates as sacrificial materials, *J. Micromech. Microeng.* V. 11, p. 733 (2001)
26. **X. Wu, H.A. Reed, Y. Wang, L.F. Rhodes, E. Elce, R. Ravikiran, R.A. Shick, C.L. Henderson, S.A. B. Allen, and P.A. Kohl**, Fabrication of Microchannels Using Polynorborene Photosensitive Sacrificial Materials, *Journal of The Electrochemical Society*, V.150 No:9, p.H205 (2003)
27. **D. Bhusari, H.A. Reed, M. Wedlake, A.M. Padovani, S.A.B. Allen, and P.A. Kohl**, Fabrication of Air-Channel Structures for Microfluidic, Microelectromechanical, and Microelectronic Applications, *IEEE Journal of MEMS*, V. 10,, No.: 3, p. 400 (2001)
28. **I. Papautsky, J. Brazzle, H. Swerdlow, and A.B. Frazier**, A Low-Temperature IC-Compatible Process for Fabricating Surface-Micromachined Metallic Microchannels, *IEEE Journal of MEMS*, V..7, No: 2, p. 267 (1998)
29. **Y. Yi, J.H. Kang, J.-K. Park**, Moldless Electroplating for Cylindrical Microchannel Fabrication, *Electrochemistry Communications* V.7, p. 913 (2005)
30. **L. Lin and A.P. Pisano**, Silicon-Processed Microneedles, *IEEE Journal of MEMS*, V. 8, No: 1, p. 78 (1999)
31. **L. Jiang, Y. Wang, M. Wong and Y. Zohar**, Fabrication and Characterization of a Microsystem for a Micro-Scale Heat Transfer study, *J. Micromech. Microeng.* V.9 p. 422 (1999)
32. **H. Becker, U. Heim**, Hot Embossing as a Method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures, *Sensors and Actuators* V.83 p.130 (2000)
33. **H.-F. Li, J.-M. Lin, R.-G. Su, Z.W. Cai and K. Uchiyama**, A Polymeric Master Replication Technology for Mass Fabrication of Poly (dimethylsiloxane) Microfluidic Devices, *Electrophoresis* V. 26, p. 1825 (2005)
34. **Y. Utsumi, M. Ozaki, S. Terabe, T. Hattori**, Improvement of Capillary Electrophoresis Property for Microchannels Fabricated by Deep X-ray Lithography, *Microsystem Technologies* V.11, p.235 (2005)
35. **J. Mizuna, T. Harada, T. Glinsner, M. Ishizuka, T. Edura, K. Tsutsui, H. Ishida, S. Shoji and Y. Wada**, Fabrication of Micro-Channel Device by Hot Emboss and by Direct Bonding of PMMA, *Proceedings of the 2004 International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems (ICMENS'04)*
36. **J. Xu, L. Locascio, M. Gaitan, and C.S. Lee**, Room-Temperature Imprinting Method for Plastic Microchannel Fabrication, *Anal. Chem.* V.72,p.1930 (2000)
37. **I. Rodriguez, P. Spicar-Mihalic, C.L. Kuyper, G.S. Fiorini, D.T. Chiu**, Rapid Prototyping of Glass Microchannels, *Analytica Chimica Acta* V.496 p.205 (2003)
38. **H. Sato, T. Kakinuma, J.S. Go and S. Shoji**, A Novel Fabrication of in-channel 3-D Micromesh Structure Using Maskless Multi-Angle Exposure and its Microfilter Application, *Proceedings of IEEE*, p. 223 (2003)
39. **L.-J. Yang, Y.-T. Chen, S.-W. Kang, Y.-C. Wang**, Fabrication of SU-8 Embedded Microchannels With Circular Cross-Section, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* V. 44, p.1109 (2004)
40. **B.-H. Jo, L.M. Van Lerberghe, K.M. Motsegood, and D.J. Beebe**, Three-Dimensional Micro-Channel Fabrication in Polydimethylsiloxane (PDMS) Elastomer, *IEEE J. of MEMS*, V. 9, No. 1, p. 76 (2000)
41. **G. Liu, Y. Tian, X. Zhang**, Fabrication of microchannels in negative resist, *Microsystem Technologies* V.9, p. 461 (2003)