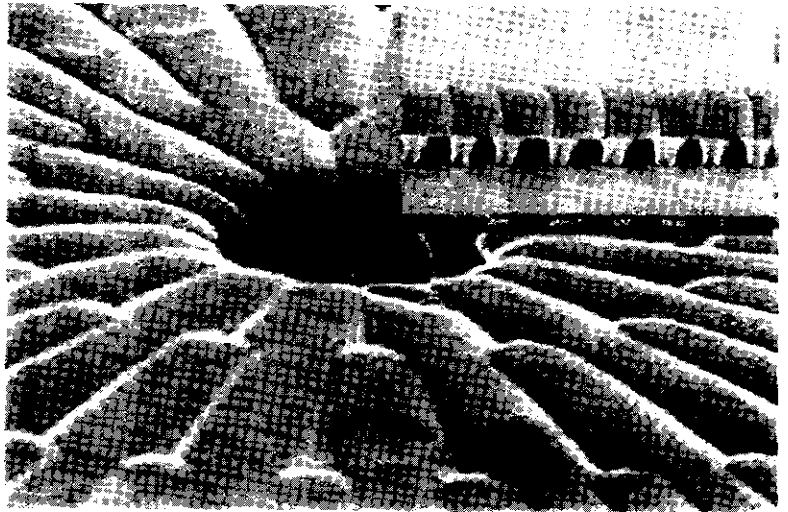


초소형 냉각기 연구 현황

이 글에서는 미세가공기술을 이용하여 최근 고 발열화하는 반도체의 냉각문제를 해결하기 위한 연구들을 소개한다. 윤 하 용

저는 정보화 시대라 불리는 21세기에 소형화와 고성능화가 이루어진 전자 제품들이 유행할 전망이다. 이는 정보를 누가 먼저 얼마나 빨리 잘 분류해서 많이 가지고 있는가에 따라 작게는 개인, 기업 그리고 나아가서는 국가의 존망이 달려있기 때문이다. 그만큼 정보의 분석, 관리 및 획득은 필수적이며, 따라서 이를 처리해야 하는 중앙처리장치(CPU)의 속도도 무척 빨라져야 하기 때문에 정보처리의 두뇌인 중앙처리장치의 고성능화와 초소형화는 가속화될 것이다. 그러나, 고성능화 및 초소형화로 더 작은 면적에 더 많은 반도체 소자들이 집적되어 단위 면적 당 발열은 지속적으로 증가하게 된다. 최근의 기술적 추세에 근거한 2003년의 개인용 컴퓨터 중앙처리장치의 성능은, 수기가 헤르쯔 주파수 대의 정보처리 속도와 수십 와트(30 W/cm², 총 150 W 이상)의 열량이 발생할 것으로 예상된다. 이러한 추세라면 수년 내



마이크로채널형 공기분사식 초소형 냉각기(남가주 대학)

에 100 W/cm²의 발열까지 도달할 것으로 예상되며, 이러한 수준의 열량은 1 메가톤급 원자탄이 1 마일 밖에서 폭발할 때 방출되는 에너지 밀도와 같다고 한다. 이러한 고 밀도의 열량을 효과적으로 소화하기 위해서는 냉각 팬의 용량과 방열 핀의 전열면적을 늘리는 방법이 있다.

그러나 냉각 팬의 용량을 늘리면 팬의 부피가 커져, 소형화하는 전반적인 기술적 추세에 부합하지 못하는 것은 물론, 소음의 증가로 인한 상품성의 저하와 에너지 소비증가로 휴대용 장비에는 사용하기 어려운 단점이 있다. 방열 핀의 경우에도 전열면적을 늘릴 경우 부피가 커져 휴대가 어려운 것은 물론, 열 밀도가 높아지면 고체의 자유전자와 격자진동에 의한 에너지 확산 방식에 의존하는 고체 전도 방식은 핀

윤하용, 삼성종합기술원, E-mail: yunh@sl.tsmc.com, yunh@sl.tsmc.com

내부에 온도 구배가 커져 핀으로서의 기능을 제대로 수행하지 못하게 된다. 따라서 주어진 공간에서 추가적인 에너지의 소비나 소음의 증가 없이 효과적으로 반도체에서 발생하는 열을 소화하기 위하여 미세 가공기술을 이용한 각종 마이크로 냉각장치에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

고성능 반도체 냉각용 초소형 냉각장치 연구 현황

고성능 반도체용 초소형 냉각장치는 크게 두 가지 측면에서 연구가 진행되고 있는데, 첫번째는 국소적으로 발생하는 열을 넓은 면적에 고르게 분포 시키는 열 확산기(Heat Spreader)에 관한 연구이며, 두번째는 넓은 면적에 분포된 열을 시스템 밖으로 배출시키는 열 분산기(Heat Dissipator)에 관한 연구이다. 열 확산기와 열 분산기의 기능을 기존의 냉각장치의 예를 들어 구체적으로 설명하면, 방열 핀이 전도에 의하여 국소적으로 가해진 열을 전체면적에 고르게 열을 분산시키는 열 확산기의 역할을 하며, 냉각 팬이 방열 핀에서 분산된 열을 공기를 매개체로 하여 컴퓨터 밖으로 배출시키는 열 분산기의 역할을 한다. 과거 20여년간의 초소형 냉각장치에 관한 연구 동향을 살펴보면 주로 열을 고르게 분산시키는 열 확산기에 관한 연구를 중심으로 이루어져 왔으나, 최근에는 열 분산기의 기능을 강화시키는 연구도 점차 활발하게 이루어지고 있는 추세이다.

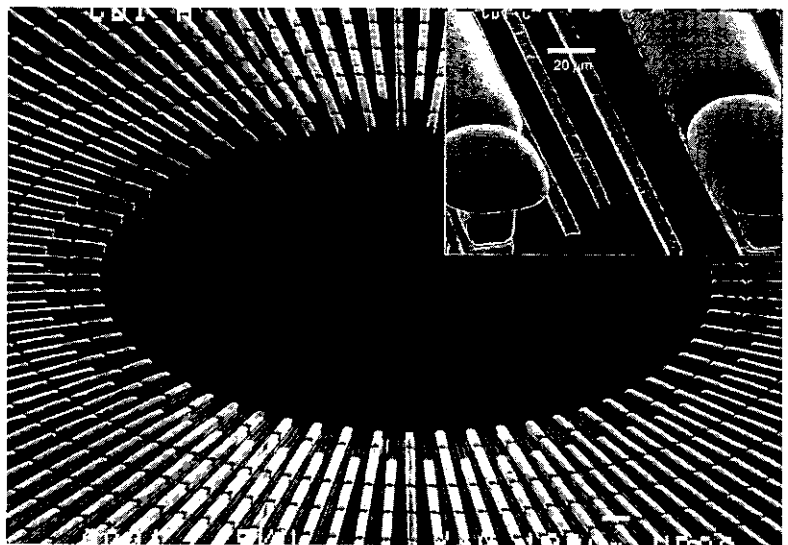
단상 강제냉각방식(액체)

반도체의 냉각방법에 대한 연구

의 역사상 가장 획기적인 발전중의 하나가 Tuckerman과 Pease가 1981년에 발표한 마이크로채널을 이용한 냉각방법일 것이다. 이들은 두께 400 μm 의 <110> 실리콘 웨이퍼에 디프 에칭(Dep Etching) 방법을 이용하여 폭 50 μm , 깊이 300 μm , 벽두께 50 μm 의 마이크로채널을 제작하고, 약 2 기압의 압력으로 증류수를 마이크로채널 내부로 흐르게 하여 반도체로의 열을 흡수하고 출구로 냉각수를 배출함으로써 790 W/cm^2 의 높은 냉각능력을 구현하였다. 이 연구는 정상상태 관내 유동에서 관내 열전달 계수가 관내경에 반비례한다는 것에 착안하여, 마이크로채널로 그 때까지 발표된 어떤 다른 방식보다 큰 냉각능력을 구현할 수 있음을 실험을 통하여 입증하였다. 이러한 액체의 강제 순환 냉각방식은 단위 면적 당 매우 많은 열량을 제거할 수 있는 장점이 있으나, 채널 내 큰 압력 강하로 인해 펌프로 액체를 공급해야 하고, 냉각수 공급원이 있어야 하는 단점이 있다.

단상 강제냉각방식(기체)

공기를 이용한 강제냉각은 크게 마이크로 제트분사 방식과 마이크로 채널에 공기를 냉매로 이용하는 방식으로 나눌 수 있다. 이 방법은 강제냉각 방식에 액체를 냉매로 이용하는 방법에 비해서는 열전달 효율이 떨어진다는 단점이 있지만 냉매를 회수·냉각하여 순환시킬 필요가 없어서 장치가 간단해 진다는 장점이 있다. 마이크로 제트분사방식은 한 개 혹은 여러 개의 노즐로 공기를 분사시켜 칩에서 발생하는 열을 강제냉각시키는 방법이다. 케이스 웨스턴 리저브 대학의 Stefanescu 등은 4 장의 400 μm 두께 실리콘 웨이퍼를 건식 식각(DRIE)하여 에폭시로 접합한 장치에, 고압으로 공기를 불어 넣어 지름이 0.25 mm인 노즐을 통하여 0.25 mm 아래에 있는 반도체와 접한 냉각표면의 표면으로 분사하여 약 15 W/cm^2 의 열량을 제거하였다. 남가주 대학의 Joo와 Kim은 마이크로 도금으로 구리나 니켈을 칩



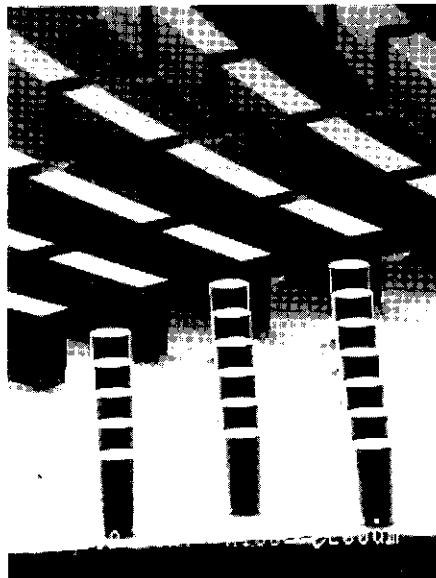
2차원 마이크로 히트파이프(샌디아 연구소)

위에 썬아 임의형상의 마이크로 채널을 제작하는 방법을 개발하였다. 이들은 이러한 공법을 이용하여, 마이크로 채널이 방사형으로 배치되고 중앙부의 흡입구에 공기를 불어넣어 방사형 채널을 통과하면서 열을 흡수하여 바깥쪽으로 빠져나가는 구조물을 제작하였다. 이러한 공기를 이용한 강제대류 방식이 극복해야 될 과제는 마이크로채널이 너무 작아 채널에 흐르는 공기냉매의 유량이 제한된다는 점이다. 채널이 너무 작으면 냉매의 단위 유량당 얻을 수 있는 열효율은 커지지만, 전체 컴퓨터 칩의 면적을 냉각하는 냉각능력은 줄어들게 된다. 따라서 이 연구는 최적의 채널 크기까지 채널을 크게 만드는 연구가 필요하며, 현재 120 μm 이상의 높이를 갖는 마이크로 채널 제작기법을 개발 중이다.

이상 유동 냉각방식

앞서 언급한 현열을 이용하는 단상 유동 냉각방식 이외에, 최근에는 잠열을 이용하는 이상 유동 냉각방식에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 단상 유동 냉각 방식은 열 확산기와 열 분산기의 기능을 복합적으로 수행하는 반면 잠열을 이용하는 이상 유동 냉각 방식은 주로 열 확산기로서의 기능을 수행하며, 시스템 밖으로 열을 배출하는 기능은 팬 등과 같은 추가적인 장치에 의존한다.

텍사스 A&M 대학의 Peterson 교수는 기존의 히트파이프를 미세 공정 기법을 이용하여 마이크로 크기로 초소형화하는 연구를 진행하고 있다. 마이크로 히트파이프는



초소형 표면장력 열구동회로(삼성종합기술원)

1984년에 Cotter에 의해 처음 제안되었으며, 일반적으로 관의 수력직경이 기액 경계면의 곡률반경보다 작은 히트파이프를 의미한다. 이 경우 일반 히트파이프와는 달리 벽면에 별도의 Wick 구조를 필요로 하지 않는 것이 특징이다. 마이크로 히트파이프의 개념을 확장하여 실리콘 위에 다수의 히트파이프가 병렬로 배치된 마이크로 히트파이프 배열도 구현되었는데, 이러한 마이크로 히트파이프와 마이크로 히트파이프 배열은 상 변화를 이용한 냉각 방식이 반도체의 국소적인 열원을 제거하는데 효과적으로 쓰일 수 있다는 가능성을 제시하였으며, 이후 상 변화를 이용한 초소형 냉각장치에 관한 연구를 활성화시켰다.

샌디아 연구소는 기존의 1차원적인 마이크로 히트파이프들을 2차원적으로 병렬 배치한 히트파이프 배열의 응용으로, 니켈합금 박막(Kovar)으로 2차원적인 평면 박막 공동을 형성하고 니켈로 된 Wick 구조를 도금한 2차원 마이크로 히트파이프를 제작하였다. 이 2차원 마이

크로 히트파이프는 기존의 1차원 히트파이프를 병렬로 배치한 것에 비해서 열 분산효과가 좋을 뿐 아니라, 열팽창 계수, 연성 등 니켈합금의 재질적 특성이 실리콘에 비해 우수하여 향후 초소형 냉각기를 실용화하는데 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

한편, 열확산기의 기능뿐 아니라 열원으로부터 원거리에 열을 이송시키는 기능을 결합한 초소형 표면장력 열 구동회로(Micro Capillary Pumped Heat Transfer Loop)에 관한 연구도 진행되고 있다. 삼성종합기술원에서는 실리콘 웨이퍼를 건식 식각 방식을 이용하여 제작한 미세 Wick 구조의 증발기와 응축기로 구성된 초소형 표면장력 열 구동회로를 이용하여 약 30 W/cm²의 열량을 제거하는 실험을 수행하였다. 이 장치는 증발기의 내부 벽면에 Wick 제작함으로써, 증발기에서 발생하는 기액 경계면의 표면장력을 이용하여 구동되는 장치로 기상과 액상이 같은 유로 내에서 마주보며 진행되는 히트파이프와는 달리 기체관과 액체관이 분리되어 단일방향으로 유체가 순환하는 것이 특징이다.

마이크로 히트파이프나 초소형 표면장력 열 구동회로가 외부의 추가적인 에너지 공급을 받지 않고 표면장력으로 구동되는 장치인 반면에, 스탠포드 대학에서는 초소형 펌프(Electrokinetic Pump)로 유체를 순환시키는 200 W급 마이크로 냉각장치를 개발하고 있다. 이 방식은 표면장력으로 구동되는 방식에 비해 구조가 복잡하고 에너지 소모가 큰 단점이 있으나 펌프에 의하여 유체가 강제로 순환되기 때문에 안정

적이고, 상대적으로 많은 열량을 제거할 수 있는 장점이 있다.

열 분산기 연구

앞 절의 열 확산기에 관한 연구가 활발하게 진행된 것에 비하여 열 분산기의 기능에 관한 연구는 많이 이루어지지 않고있는 실정이다. 열 확산기에서 넓은 면적으로 확산된 열이 공기를 통하여 시스템 밖으로 배출되지 않을 경우 결국 시스템 내부에 누적된 열에 의하여 반도체의 온도가 상승하고, 냉각능력이 저하된다. 따라서, 효과적인 열 분산기에 관한 연구도 병행되어야 초소형 냉각기의 성공적인 개발이 가능하다. 앞에서 언급한 바와 같이, 과거에는 수냉식 시스템이 많이 연구되었으나, 장치가 복잡하고 후대가 불편하여 현재는 공냉식 방법이 주로 연구되고 있다. 공냉식의 경우 응축기에서 공기로 전달된 열량은 열 전달 면적과 온도차, 그리고 열 전달 계수의 곱으로 표시된다. 이 중에서 온도차는 반도체의 최대 허용온도와 주위 대기온도에 의하여 결정되므로, 결국 열전달 양은 열전달 면적과 열전달계수에 의해서 결정된다. 과거에는 방열 핀의 크기를 크게 하거나 팬의 풍량을 키움으로써 응축기에서의 열전달 양을 증가시켜왔다. 그러나 휴대용 컴퓨터나 다기능 통신단말기와 같이 공간의 제약이 받는 곳에서는 사용이 어려워, 방열 핀의 크기와 팬의 풍량을 증가시키지 않으면서도, 열전달을 증가시킬 수 있는 방안이 요구되고 있으며, 이에 공기층 열전달 계수를 증가시키는 연구가 시도되고 있다.

삼성종합기술원에서는 응축기 표면에 형성되는 공기경계층을 교란

시켜 열전달계수를 향상시키는 연구를 진행하고 있다. 기존의 응축기 외부 표면에 미세 구조물을 제작하고 팬으로 공기를 응축기 표면에 불어주면 미세 구조물이 유체공진을 일으켜, 공기경계층 내부의 공기가 표면에 수직인 방향으로 순환하게 된다. 이러한 공기경계층 내부의 순환으로 정체된 공기분자들 간의 확산이 아닌, 응축기 표면의 고에너지 공기분자가 공기경계층 표면으로 직접 에너지를 이송하는 대류에

향후 발전방향

미세 가공기술을 이용한 초소형 냉각기는 단상 유동에서 이상 유동을 이용하는 방향으로 발전하여 왔으며, 열 확산기의 연구에서 점차 열 분산기의 연구로 확대되고 있다. 현재의 연구 방향은 마이크로 크기에서의 열 유동현상을 이해하는 기초 연구와 표면장력(초소형 펌프 등을 이용한 다양한 형태의 시스템 개발, 그리고 가격, 기계적 특성, 및



초소형 핀을 이용한 공기경계층 교란에 의한 열전달 촉진장치(삼성종합기술원)

의하여 열을 전달함으로써 열전달 계수를 증가시키는 효과를 가져오게 된다. 한편, 미세 구조물로 직접 공기경계층을 교란시키는 방법 이외에도, 음파로 자연대류 공기를 가진시켜 열전달을 촉진시키는 연구가 한국과학기술원에서 진행되고 있으며, 이 방법을 사용하여 팬을 사용하지 않고도 강제대류 열전달 계수와 같은 정도의 열전달 촉진효과를 구현하였다.

가공성이 우수한 비실리콘 재질 미세가공기술의 개발 등 다양한 측면에서 이루어지고 있다. 이러한 초소형 냉각기의 연구는 고성능화 되는 반도체의 발전을 뒷받침하는 동시에, 유전자 칩(DNA Chip)의 초소형 분석시스템(Micro TAS), 초소형 효소중합반응기(Micro PCR) 등의 생명공학 기술 등 다양한 분야에 파급효과를 미칠 것으로 예상된다.