

안정 동위원소의 분야별 이용 현황과 전망

- IT/NT 산업 분야 -



박 현 민



정 도 영

한국원자력연구소
양자광학기술개발부 책임연구원

본 회보의 지난 호에서는 안정 동위원소의 개략적인 소개와 이용 현황에 대한 내용을 다루었다[1]. 안정 동위원소는 자연적으로 280여 종류가 존재하고, 각 안정 동위원소의 특성에 따라 IT/NT, BT, RT, 원자력 산업 분야 등에서 폭 넓게 이용되고 있다. 이번 호부터는 각 분야에서의 안정 동위원소의 이용 현황 및 전망에 대하여 다루고자 한다.

IT/NT 분야에서는 실리콘(Si) 안정 동위원소를 이용한 첨단 신소재 개발이 가장 주목받고 있다. 고 집적 반도체 및 전력 반도체 부분에서 Si 안정 동위원소를 이용한 소자는 기존 소자에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 알파선 발생을 줄인 저 알파 감손 납(LAL, Low Alpha Lead)은 반도체 논리 소자의 동작 오류를 줄일 수 있어 고집적 반도체의 패키징 솔더(solder) 물질로 사용되고 있다. 이 밖에 안정 동위원소는 중성자 변환 도핑 (NTD), 열전도도가 향상된 인공 다이아몬드 제조, 고체 양자 컴퓨터의 소재

등으로 이용된다. 이 글에서는 위에서 열거한 IT/NT 분야의 이용 현황에 대하여 기술하고 향후 전망을 살펴보고자 한다.

1. 반도체 산업에서의 실리콘 동위원소의 이용

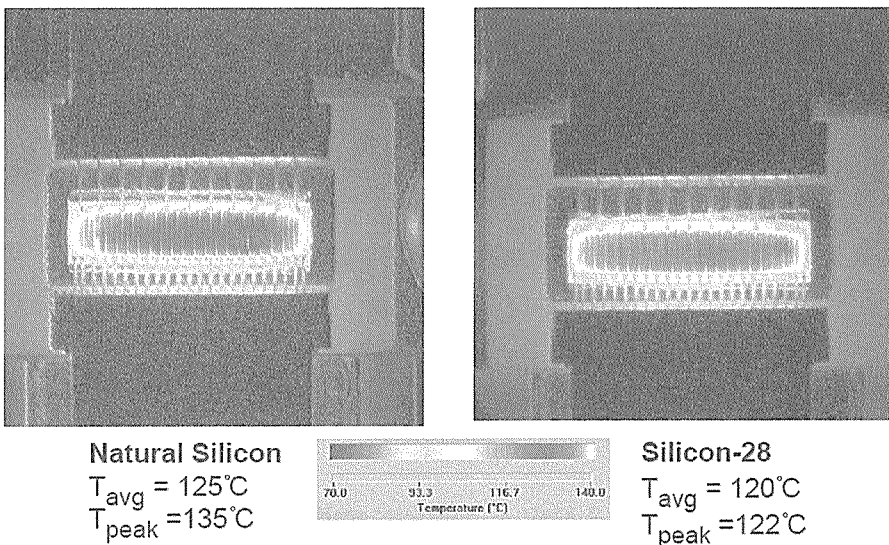
20 세기 과학 기술 혁명을 주도했던 컴퓨터 기술은 고 순도의 실리콘 소재 개발을 통하여 가능했다는 것은 주지의 사실이다. 현재 반도체 소자의 90% 이상이 실리콘으로부터 만들어지며, 대부분의 반도체 공정이 실리콘을 대상으로 한다. 이러한 실리콘 기반 반도체 기술은 여러 기술적 한계를 극복하고 점점 나노 크기의 영역으로 그 무대를 옮기고 있다. 이미 반도체 산업계에서는 ‘마의 장벽’이라 불리던 0.1 마이크로 영역을 넘어, 90 나노미터급 D램 양산기술을 확보하였고 지금은 극미세 반도체 기술 개발에 도전하고 있다. 한편으로는

반도체 소자가 점점 소형화, 고 집적화 되면서 단위 부피당 발열량이 급속히 증가하는 문제가 대두되고 있으며 이를 해결하기 위해 많은 노력이 이루어지고 있다. 안정 동위원소인 Si-28을 이용한 차세대 반도체 소자 개발도 그중 하나이다.

실리콘의 경우 자연계에 Si-28(92%), Si-29(4.7%), Si-30(3.3%) 세 개의 안정동위원소가 존재하며 상용화된 모든 반도체는 자연 실리콘을 사용하고 있다. Si-29와 Si-30은 전체 실리콘 원소 중 8%를 차지하기 때문에 92%인 Si-28에 대해서는 일종의 불순물로 작용하여 반도체 소재의 열전도도(thermal conductivity)를 떨어뜨리는 원인이 된다. 일반적으로 고체에서의 열은 원자들의 진동인 포논(phonon)에 의하여 전달되는데, 불순물이 많이 첨가되면 포논의 자유로운 운동이 방해 되어 열전도도는 감소하게 된다. 이는 실리

콘 동위원소 중에서 Si-29와 Si-30을 제거하고 순수한 Si-28 만으로 구성된 반도체를 만들면 열전도도가 크게 향상될 수 있음을 의미한다. 실제로 99.9%로 농축된 Si-28을 사용할 경우 20K의 온도에서는 6배, 상온에서는 10~60%까지 열전도도가 증가하는 것이 보고되었다[2-3]. 최근에는 <그림 1>과 같이 99.9%의 Si-28을 이용하여 RF LDMOS 라는 파워 트랜지스터를 제작하여 동작 온도를 측정해본 결과 자연 Si에 비해 접합 부분에서 5 °C 내지 7 °C 정도 온도가 내려가는 것이 보고되었다[4].

반도체 소자의 동작 시 발생된 열은 대부분의 경우 소자의 성능 및 안정성에 나쁜 영향을 미친다. 마이크로 프로세스의 경우 약 천 만개의 트랜지스터가 몰려있는 논리 회로 부분에서 대부분의 열이 발생한다. Si-28을 사용하여 CPU를 제작하면 중심 부분에서 온도를 크



(그림 1) Si-28로 제작된 파워 트랜지스터의 발열 특성 사진. 자연 Si로 만든것에 비해 5 °C 정도 평균온도가 내려감 [4].

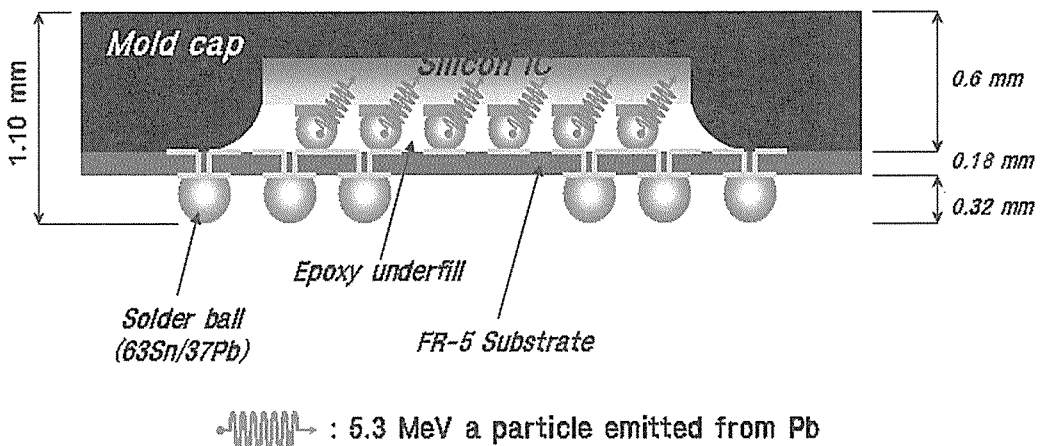
게 낮출 수 있다. Intel사는 10 °C 정도 온도를 낮추면 CPU의 성능을 2배 이상 향상 시킬 수 있다고 평가하였다. 이 밖에도 Si-28을 사용하면 웨이퍼 당 만들 수 있는 칩 개수를 늘릴 수 있고 고속 스위칭 등을 가능하게 하며 다른 냉각 장치에 비해 비용을 크게 줄일 수 있다.

미국의 Isonics사에서는 Si-28을 이용한 반도체 소자 및 웨이퍼 제작에 많은 투자를 하고 있으며, 2003년 국제 반도체기술 로드맵(ITRS)에서도 Si-28을 주목해야 할 5대 차세대 반도체 소재 중 하나로 지목하였다. Si-28 소재는 현재 러시아에서 주로 생산되고, 호주, 남아공, 일본 등에서 생산시설 건설을 추진하고 있다. 현재는 농축된 Si-28의 가격이 자연 Si에 비해 3~4 배 정도이나 장래에는 2 배까지 줄어들 것으로 예상된다. 그 경우 Si-28은 마이크로프로세서, 전력 반도체, 차세대 메모리 칩 등에 광범위 하게 이용되어 현재 형성되어 있는 50억불 웨이퍼 시장의 상당 부분을 점유할 수 있을 것으로 전망한다.

2. 감손 납(Pb)을 이용한 저 알파 솔더링 (Soldering)

전자 부품의 솔더링에 사용된 후 폐기된 납들은 지하수로 용출되어 심각한 환경 문제를 야기한다. 이러한 환경 문제로 인하여 최근 유럽과 일본을 중심으로 무납(lead-free) 솔더링에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 주요 대체 재질로서 개발된 Sn/Ag, Sn/Cu, Sn/Bi, Sn/Ag/Cu 합금등이 아직까지 Pb 합금을 이용한 솔더링에 성능이 미치지 못하고 있다. 당분간 솔더링에서 납에 대한 지속적인 의존이 불가피한 실정이다.

한편 환경 문제와 더불어 전자 산업이 점차 소형, 경량화, 고집적화를 추구하면서 솔더링 납에서 방출되는 알파 입자(He의 핵)의 영향이 커지고 있다. 현재 솔더링에 사용하고 있는 일반 납에는 극소량이지만 자연적으로 발생하는 Pb-210 방사성동위원소가 포함되어 있다. Pb-210은 반감기가 22.3년인 방사성동위원



〈그림 2〉 일반 납 솔더링시 플립칩 패키지 공정에서 발생할 수 있는 soft error

소로서 Po-210 으로 붕괴한 후 다시 알파 입자를 내면서 Pb-206 이 된다. 이 과정에서 방출된 알파 입자가 반도체의 정상동작을 순간적으로 방해하는 “soft error”를 발생시킨다. 1978년 Intel이 차세대 IC 소자를 개발하면서 처음으로 발견한 “soft error”는 알파입자가 반도체 소재인 Si 소재를 통과하면서 전자와 정공을 형성하여 반도체 소자를 대전시키고, 이 전하들이 소자의 축전기(capacitor) 등에 축적되면서 반도체 논리 회로에 순간적인 오류를 일으키는 현상이다[5]. 이 현상은 <그림 2>와 같이 솔더 물질과 반도체 IC 가 아주 근접해 있는 플립칩 패키지 공정에서 자주 발생하며, 특히 250 nm 이하의 CMOS 기술과 같이 소자가 소형 경량화 되고 단위 volume 당 트랜지스터 수가 증가하면서 보다 빈번하게 일어난다. 이와 같이 일반 납에서 방출하는 알파 입자의 영향을 최소화하기 위하여 최근 고성능 반도체에는 솔더링 재료로서 Pb-210이 제거된 감손 납을 사용하고 있다. 많은 양의 납 솔더링이 요구되는 SRAM 제조나, 논리 소자인 ASIC, 그리고 다량의 CPU와 DRAM이 결합된 서버 등이 그 예이다.

저 알파 감손납(LAL)은 냉(cold) 납 광석, “고대 납”과 같이 자연적으로 얻을 수 있고, 일반 납으로부터 레이저 동위원소 분리 방법에 의해서 인공적으로 얻을 수도 있다. 냉 납 광석은 자연적으로 알파 방출이 적은 납 광석으로서 알파 방출 비율에 따라 LC1 (0.2-0.5 CPH/cm²), LC2 (0.05 CPH/cm²), LC3(0.005 CPH/cm²) 등급으로 구분 한다. 일반 납의 알파 방출 비율은 1-10 CPH/cm² 정도이며 우주선으로부터 자연적으로 발생되는 알파선은 약 0.005 CPH/cm²이다. “고대 납”은 과거에 바다로 침몰된 배나 고대에 사용된

수도관에서 사용된 납으로서, 오랜 시간동안 Pb-210이 Pb-206으로 변환되어 알파 방출량이 0.0002 CPH로 매우 낮지만, 그 양이 제한되어 있다. 레이저 동위원소 분리법은 레이저에 의해 특정한 납 원자를 모으거나 제거하는 기술이다. 이 방법은 단일 공정으로 Pb-210의 비율을 10-100배 감소시킬 수 있어 알파 방출을 0.001 CPH/cm² 까지 줄일 수 있고, 생산 공급량에 제한이 없어 가장 잠재력을 가지고 있는 것으로 평가받고 있다.

LAL은 현재 Pure Technologies 사, Olovo 사 등에서 생산, 판매하고 있으며, 가격은 자연 납이 \$0.3lb 이고, LAL은 등급에 따라 \$10에서 \$1,000까지 다양하다. 반도체 업계에서는 Intel, IBM, Delco, Solectron 등에서 차세대 마이크로 프로세서 개발을 위해 LAL을 사용하고 있고, Compaq등은 알파칩에 LAL을 사용하고 있다. 지금까지는 LC2등급을 주로 사용하지만, 반도체 집적도가 증가하면서 LC3단계로 이동할 전망이며, 전체 시장 규모도 매년 35% 이상 성장하고 있다 [6].

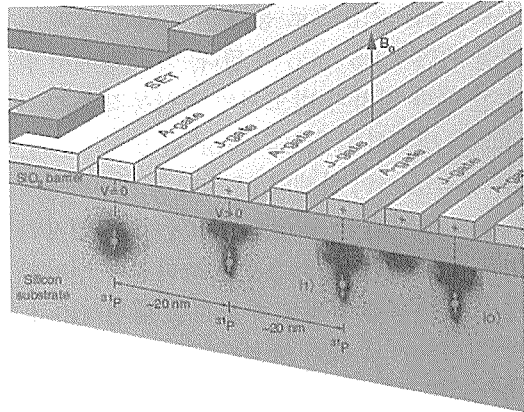
3. Si-28을 이용한 양자컴퓨터 개발

1946년 최초의 컴퓨터인 ENIAC 이 개발된 이후, 트랜지스터의 발명과 반도체 집적회로의 개발로 컴퓨터 기술은 비약적으로 발전하였다. 하지만 이러한 컴퓨터 기술은 원자 단위 이하로 소자 크기를 줄일 수 없어 결국은 한계를 드러내리라고 예상된다. 양자 컴퓨터(Quantum Computer)는 그 한계를 극복한 새로운 개념의 컴퓨터이다.

기존 컴퓨터는 보통 비트(bit)라고 하는 단위 논리 소자에 1과 0으로 표시되는 2진법 데이터를 표시한다. 각각의 비트에 저장된 데이터는

독립적으로 계산된다. 그러나 양자컴퓨터는 물리학의 양자 역학 개념을 도입하여 데이터를 병렬적으로 처리할 수 있는 특징이 있다. '큐비트(Qubit)'라 불리는 양자 비트 하나로 0과 1의 두 상태를 동시에 표시할 수 있고, n 개의 큐비트는 2의 n 제곱만큼의 상태를 중첩시키는 것이 가능하며, 데이터의 병렬처리에 의하여 연산속도는 기존 컴퓨터와 비교할 수 없을 만큼 빨라진다. 현재의 컴퓨터로 1,000 자리의 숫자를 소인수 분해하는데 걸리는 시간이 우주 나이보다 많이 걸리는데 비해 양자 컴퓨터를 도입하면 몇 십 분에 해결 가능하다는 예측도 있다. 그러나 양자 컴퓨터의 개발은 현재 태동단계로서 이론적 가능성을 타진하는 단계이며 구체적으로 어떤 하드웨어 장치를 통해 Qubit을 구현해야 하는지도 확립되지 않은 실정이다. 1995년 이온 Trap을 이용한 Qubit의 구현이 제한적이거나 최초로 이루어졌고, 1997년 핵자기 공명을 이용한 Qubit의 실현이 제시된 이후 현재 5~6개의 Qubit이 실현되었다. 이외 초전도 소자, 양자 공진기, 광자 등을 이용한 Qubit의 실현이 제안되었다. 하지만 대부분의 구현 방법들이 실질적으로 양자컴퓨터를 구현할 수 있을 정도로 Qubit의 갯수를 늘리는 scalability 부분에서 많은 어려움에 직면하고 있다.

한편 1998년 Kane 등은 실리콘에 1/2의 핵 스핀 값을 갖는 인 동위원소 P-31을 도핑하여 P-31의 핵 스핀을 Qubit 으로 사용하는 방법을 제안하였다[7]. 그 Qubit은 자기장의 상태에 따라 두개의 자기 모멘트 상태를 갖게 된다. P-31의 핵 스핀은 공간적으로 쿨롱 힘에 의해서 고립된 P-31의 최외각 전자와 초미세 상호작용을 하면서 바뀌게 된다. <그림 3>에서 볼 수 있듯이 최외각 전자의 상태는 외부에 부착



<그림 3> 실리콘에 P-31을 도핑시켜 구현하고자 하는 양자 컴퓨터 개념도[9].

된 전극(A-gate)에 의한 전압 변화에 의하여 조절 될 수 있다[8]. 또한 이웃한 Qubit 사이의 상호작용은 중간 전극(J-gate)에 인가된 전압 변화에 의하여 가능하게 하여 양자 컴퓨터의 병렬 처리를 구현한다.

이 기술은 기존 디지털 컴퓨터를 구현하기 위하여 개발된 현재 반도체 기술로서도 구현 가능하다는 장점이 있고, 다른 기술이 넘지 못하고 있는 scalability가 용이하다는 점이 주목할 만하다. 현재 이 기술은 가장 실현 가능한 양자 컴퓨터 구현 기술로 평가 받고 있다.

그러나 이 방법을 현실화하기 위해서는 중요하게 해결해야 할 문제가 있다. P-31이 도핑되는 바탕 물질인 실리콘은 자연적으로 세 개의 안정 동위원소 (Si-28, Si-29, Si-30)를 가지고 있다. Si-28과 Si-30은 핵 스핀이 없어 문제가 없지만 Si-29는 1/2인 핵 스핀을 가져 이 동위원소가 도핑된 P-31의 핵 스핀과 전자의 조작을 방해하게 된다. 이러한 방해는 동시에 여러 가지 일을 하던 양자 컴퓨터를 한 번에

한 가지 일만하는 보통 컴퓨터로 되돌아 가버리게 한다. 이 문제를 해결하기 위해서는 가급적 Si-29를 없애야 한다. 충분히 P-31이 방해받지 않고 일을 하기 위해서는 10^4 - 10^5 정도로 동위원소가 농축된 Si-28을 사용해야 한다는 견해도 있다[9]. 물론 P-31 대신에 Si-29의 핵 스핀을 Qubit으로 사용하는 방법도 제안되었지만 이 경우 역시 고도의 Si-28 및 Si-29의 동위원소 농축이 필요하다.

양자컴퓨터를 언제쯤 실용화 할 수 있을가에 대해서는 20년 후면 가능하다는 낙관적인 견해와 함께 실용화가 매우 어려울 거라는 견해도 있다. 그러나 Si-28을 이용한 양자 컴퓨터 구현 기술이 보다 진척된다면 낙관적인 전망 쪽으로 기울 거라고 예상되며, 그 기술 구현의 핵심에 Si-28 동위원소 농축 기술이 있다.

4. 안정동위원소를 이용한 중성자 도핑 (NTD)

반도체 공정에서 많이 사용되는 실리콘 웨이퍼는 한 번의 공정에서 가능한 많은 칩을 생산할 목적, 또는 고 전력 반도체 소자에 이용할 목적으로 점점 웨이퍼의 크기가 커지고 있다. 반도체의 특성을 갖기 위하여 웨이퍼에 다른 불순물 원소를 섞어 도핑을 하는데, 웨이퍼 직경이 늘어나면서 불순물을 균일하게 도핑 시키는 것이 기존의 결정 성장 방법으로는 어려워지고 있다. 이에 대한 해결 방법의 하나로 중성자 도핑 방법 (NTD, Neutron Transmutation Doping)이 있다.

NTD는 어떤 동위원소가 원자로 등에서 열 중성자를 흡수하고 베타 붕괴하면 원자 번호가 하나 증가한 다른 동위원소 원소로 변화하는 것을 이용한다. Si-30의 경우 중성자를 흡

수하여 Si-31로 변환되고, 다시 2.6 시간의 반감기를 가지고 베타 붕괴를 하여 안정적인 P-31로 변환된다. NTD를 이용한 반도체 도핑의 경우 중성자가 실리콘 단결정 깊숙이 침투하여 공간적으로 매우 균일하게 도핑할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 단위 시간당 조사되는 중성자 양이 일정하다면 조사 시간을 조절하여 도핑 비율을 정밀하게 조절할 수 있다. 하지만 도핑 농도를 높이고자 할 경우 중성자 조사 시간이 길어지고, 도핑시 수반된 방사선 오염을 제거하는데 많은 시간을 요구한다. 이 때문에 반도체 회사에서는 시간과 비용 문제 때문에 꼭 필요한 경우가 아니면 가스 도핑 같은 다른 반도체 도핑 방법을 사용하려는 경향이 있다.

안정 동위원소의 이용은 NTD가 가지는 단점을 극복하기 위한 하나의 방법이 될 수 있다. 원자료가 평균 $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 정도의 중성자속(Flux)을 가질 경우 자연 Si을 한 달 정도 조사시키면 최대 10^{16} cm^{-3} 정도 P-31의 도핑 비율을 얻을 수 있다. 만약 자연의 Si 대신에 90% 이상 Si-30이 농축된 실리콘을 사용하면, Si-30의 자연 구성비가 3.1% 이므로 P-31의 도핑 비율을 최대 30 배까지 늘일 수 있다[10]. 이는 같은 도핑 비율을 얻기 위하여 중성자 조사 시간을 30분의 1까지 줄일 수 있음을 의미하며 이로 인해 도핑 경비 및 방사선 손상을 크게 줄일 수 있다. 또한 중성자속이 소규모인 원자로에서도 NTD를 가능하게 한다.

현재까지 다른 도핑 기술은 균일도 측면에서 NTD를 따라올 수 없고, 산업계에서도 보다 큰 전력을 제어하는 전력 트랜지스터의 제공을 요구하고 있다. NTD가 비용이나 시간 면에서 일부 단점을 가지고 있지만, 현재 안정 동위원소를 이용하여 그러한 단점을 극복하면

향후 NTD의 수요는 급격히 증가할 것으로 전망된다.

5. 인공 다이아몬드와 탄소 나노튜브에서의 안정 동위원소의 활용

다이아몬드는 강도, 열 팽창률, 열 전도도, 광학적 성질 등에서 매우 우수한 특성을 갖는 물질이다. 천연 다이아몬드는 워낙 고가이므로 용도가 제한되고 있고 산업용으로는 인공적으로 합성된 다이아몬드가 사용된다. 현재 상업적으로 다이아몬드를 합성하는 방법으로는 CVD(Chemical Vapor Deposition)가 있다. CVD를 통해 여러 층으로 제작된 다이아몬드는 도핑 원소에 따라 반도체 소자, 광 가이드 등에 주로 이용되고, 통신용 레이저나 고전력 소자에 사용되기도 한다[11].

보통 자연 다이아몬드는 98.8%의 C-12와 1.1%의 C-13으로 구성된다. 다이아몬드 경우 열은 대부분 탄소 원자의 포논 진동에 의하여 전달되는데, 주로 C-13이 불순물로 작용하여 포논 진동이 방해받게 되고 이로 인하여 열전도도가 감소한다. 실제로 C-12의 비율을 99.9%로 높여 다이아몬드를 만들면 상온에서 50% 정도 열전도도가 증가함이 보고되었다 [12]. 또한 140 K에서 99.999%로 높은 C-12를 사용할 경우 열전도도가 급격히 증가하여 상온에서 구리 기관에서 동작하는 회로보다 500 배의 파워가 원활하게 동작할 수 있음이 예측되었다.

농축된 C-12를 사용하여 제작된 다이아몬드

는 열이 많이 발생하는 반도체 소자의 열 전달 매개체로 사용될 수 있다. GE와 Sumitomo 사는 CVD를 이용하여 순수한 C-12 다이아몬드를 만들고 있으며, 제작된 다이아몬드는 아주 우수한 열 전달체로 사용되고 있다.

탄소 나노 튜브도 우수한 기계적, 열적, 전기적 성질 때문에 매력적인 나노 물질로 각광 받고 있다. 다이아몬드와 마찬가지로 탄소 원자로 구성되는 탄소 나노 튜브도 C-13을 제거함으로써 열 전도도를 크게 향상시킬 수 있음이 보고되었다.

6. 결 론

석기 시대 이래 인류의 과학 문명은 새로운 소재의 개발과 더불어 발전해 왔다. 20세기 중반부터 개발된 실리콘 소재는 현재의 눈부신 정보 통신 기술을 탄생시켰으며 나노 및 바이오 소재가 21세기의 과학 발전을 주도할 것임은 의심의 여지가 없다. 이 글에서 다른 동위원소의 미세한 차이를 이용하는 안정 동위원소 소재도 21세기 IT/NT 분야의 신기술을 주도할 수 있는 주요 신소재로 전망된다. 반도체가 점점 고집적화 되면서 필연적으로 발생하는 열 문제를 Si-28 동위원소가 해결할 수 있으며, 저 알파 감손 납(LAL)은 컴퓨터 등의 예측할 수 없는 오류를 줄일 수 있고, 새로운 혁명의 시작이 될 수 있는 양자 컴퓨터 기술의 핵심에는 Si 안정 동위원소가 있다. 국내에서도 이러한 추세에 맞추어 안정 동위원소를 이용한 신소재 개발에 많은 관심이 요구된다. **KRIA**

참고문헌

- [1] 정도영, 동위원소 회보, Vol. 20, No. 4, 57 (2005)
- [2] T. Ruf, R. Henn, M. Asen-Palmer, E. Gmelin, M. Cardona, H. Pohl, G. Devyatych, and P. Sennikov, Solid State Commun., 115, 243 (2000)
- [3] D. G. Cahill and F. Watanabe, Phys. Rev. B 70, 2353221 (2004)
- [4] I.C. Kizilyalli, H. Safar, J. Herbsommer, S.J. Burden, P.L. Gammel, IEEE Electron Device Lett. 26, 404 (2005)
- [5] N.C. Lee, SMTA International Conference (2000)
- [6] S. Berry and S. Winkler, Chip Scale Review, 6 (1999)
- [7] Kane. B.E. Nature, 393, 133 (1998)
- [8] R.G. Clark, P.C. Hammel, A.Dzurak, A. Hamilton, L. Hollenberg, D. Jamieson, C. Pakes, Los Alamos Science 27, 284 (2002)
- [9] R. Keyes, J. Phys.: Condens. Matter 16, V11 (2004)
- [10] Issai Shilimak, Proceedings on International Workshop in Frontiers in science and technology, Israel (2003)
- [11] Linares et al, 미국특허 6858080 B2 (2005)
- [12] Lanhua Wei, P.K. Kuo, R.L. Thomas, T.R. Anthony, and W.F. Banholzer, Phys. Rev. Lett. 70, 3764 (1993)

