초전도 전자소자

DOI: 10.3938/PhiT.20.036

정연욱·이용호·김용함

Superconducting Electronics

Yonuk CHONG, Yong Ho LEE and Yong Hamb KIM

Superconducting electronics has been developed along the 100-year history of superconductivity. In this article, we will briefly review several representative superconducting electronic device applications. Josephson junction technology has become mature enough to fabricate very complex integrated circuits. The quantum voltage standard is now used to define the unit of voltage, the “volt.” Superconducting quantum interference device (SQUID) sensors are now used in medical applications to measure the magnetic field generated by the heart or the brain. Superconducting low-temperature detectors have now reached an energy resolution of 1.6 eV for 6-keV X-ray photons, and the application areas range from nuclear material analysis to dark matter search. Superconducting circuits are strong candidates for realizing a quantum computer. At the same time, qubit is a useful tool for

studying a quantum system coupled to that system. Although this short review cannot cover all the various aspects of superconducting electronics, we hope this article will give an insight into how versatile and interesting superconducting electronics is.

들어가는 글

초전도체는 저항이 0이 되는 현상으로 잘 알려져 있지만, 물리적인 입장에서는 눈에 보이는 거시적인 물체에서 양자역학적인 상태를 관찰하거나 제어할 수 있는 양자소자를 제작할 수 있다는 점에서 더욱 흥미로운 대상이다. 초전도체에서 저항이 없어지는 성질, 자속이 양자화되는 현상, 초전도체의 위상 간섭에 의한 양자현상, 정상상태에서 초전도 상태로의 급격한 상전이 등의 현상을 이용한 다양한 전자소자의 개발과 응용은 지난 100년의 초전도 역사에서 꾸준히 연구되고 발전되어 온 주제이다. 이 글에서는 초전도체를 이용한 전자소자의 개발에 대하여 개략적으로 살펴보고, 다양한 초전도 소자들 중에서 현재 활발하게 응용되고 있는 초전도 양자소자와 센서들을 중심으로 현재의 기술수준을 살펴보기로 한다.

저자약력

정연욱 박사는 서울대학교 이학박사(1999)로서, 독일 Jülich 연구소, 미국 NIST 연구원을 거쳐 2005년부터 한국표준과학연구원 책임연구원으로 재직 중이다. 초전도 조셉슨 소자를 이용한 전압표준 개발 및 잡음온도계 연구를 수행하였으며, 초전도 큐비트 연구를 진행하고 있다.
(yonuk@kriss.re.kr)

이용호 박사는 KAIST 이학박사(1989)로서, 1989년부터 한국표준과학연구원 책임연구원으로 재직 중이다. SQUID를 이용한 생체자기측정 연구를 수행하고 있으며, 심자도 측정기술 및 뇌자도 측정기술을 개발하고 있다.
(yhlee@kriss.re.kr)

김용함 박사는 미국 브라운대학 이학박사(2003)로서, 브라운 대학교 박사 후 연구원을 거쳐 2005년부터 한국표준과학연구원 선임연구원으로 재직 중이다. 초전도 센서를 이용한 저온검출기 연구를 수행하고 있다.
(yhkim@kriss.re.kr)

조셉슨 접합과 집적 소자

초전도체를 이용한 전자소자는 매우 다양한 형태로 발전되어 왔으므로 이 글에서 모두 다루기에는 방대한 분량이다. 하지만 대부분의 전자소자 응용의 중심에는 조셉슨 접합이 큰 역할을 하고 있다. 1962년 당시 캠브리지 대학의 대학원생이었던 조셉슨(Josephson)이 발표한 논문^[1]에서 처음 등장한 조셉슨 현상은 두 개의 초전도체가 얇은 절연체 또는 금속

REFERENCES

- [1] B. D. Josephson, Phys. Lett. **1**, 251 (1962).

Fig. 1. Josephson voltage standard devices fabricated on a silicon wafer. (KRISS)

등으로 분리되어 있는 경우 두 초전도체 사이에 일어나는 초전도 전자쌍의 터널링 현상이며, 이 발견으로 조셉슨은 1973년 33세의 나이에 노벨상을 수상하게 된다. 조셉슨 접합은 다음 두 개의 조셉슨 관계식을 따른다.

$$I = I_c \sin \Delta \phi, \quad V = \frac{\hbar}{2e} \frac{d}{dt} \Delta \phi \quad (1)$$

여기서 I , V 는 각각 전류와 전압이며, $\Delta \phi$ 는 두 초전도체 사이의 양자역학적 위상차이다. 수식에서 보듯이 조셉슨 접합에서는 고전적인 물리량인 전류와 전압의 측정이 바로 양자역학적 위상과 관련되어 있으며, 이것이 양자소자를 구현하는데 가장 중요한 요소가 된다.

조셉슨 현상은 물리현상의 연구에도 매우 좋은 도구이며, 특히 고온 초전도체의 에너지갭 대칭성 등의 연구에 결정적인 역할을 하기도 하였다. 하지만 전자소자에의 본격적인 응용이 가능하게 된 것은 1970년대부터 1983년까지 진행된 IBM의 조셉슨 컴퓨터 프로젝트와 1980년대에 일본에서 진행된 조셉슨 컴퓨터 프로젝트(MITI 프로젝트)의 결과물으로써 안정적이고 재현성 있는 초전도 박막제작과 조셉슨 접합의 대규모 집적 공정이 확보된 것이 가장 큰 동력이었다고 할 수 있다. 특히 1983년 미국 벨연구소 연구진에 의해 개발된 Nb/AlO_x/Nb 구조의 조셉슨 접합은 지금까지도 가장 안정적인 조셉슨 소자를 제작하는 기본 방법이다.^[2]

현재 조셉슨 소자가 가장 실용적으로 응용되고 있는 경우는 조셉슨 전압표준소자이다. 조셉슨 접합에 주파수 f 인 마이크로파를 주사하는 경우, $hf/2e$ 의 정수배에 해당하는 전압에서 전류-전압 곡선에 계단이 발생한다. 이를 샤피로 계단

(Shapiro step)이라고 하며, 이에 따라 물리기본상수와 주파수에 의해서만 전압을 정의할 수 있는 방법을 제시하게 된다.

1990년 국제도량형총국(BIPM)에서는 약속으로서의 조셉슨 상수를 $K_J = h/2e = 0.4835979 \mu\text{V}/\text{GHz}$ 로 정하고, 이에 따라서 전압의 단위 볼트(V)를 정의하고 있다. 즉 마이크로파의 주파수는 원자시계에 의하여 유효숫자 13개 이상으로 쉽게 정의되므로, 조셉슨 접합에서 주파수 1 GHz당 발생하는 샤피로 계단의 전압을 $0.4835979 \mu\text{V}$ 로 정하여, 전압을 정의하고 있다. 하지만 실제로 조셉슨 소자에 인가할 수 있는 마이크로파 주파수는 최대 수십 GHz 정도인데 반해서, 실용적으로는 전압의 비교를 위해서는 통상적으로 유용한 전압 범위인 1.08 V와 10 V의 전압을 발생하는 소자가 필요하므로, 실제 조셉슨 전압표준소자는 수천~수십만 개의 조셉슨 접합을 직렬로 연결하여 실용적인 전압출력을 얻어낸다. 이때 수많은 조셉슨 접합을 마이크로파 회로 안에 균일하게 집적하는 제작 공정이 필요하게 되며, 현재 Nb를 기반으로 하는 SIS 접합소자가 각국의 표준연구기관에서 사용되고 있고, 한국표준과학연구원에서도 지난 20여 년 간 꾸준한 연구개발을 통하여 자체적으로 조셉슨 전압표준소자를 제작하는 기술을 선도적으로 확보하여, BIPM에 세계에서 두 번째로 1 V 전압표준소자를 공급하였다. (그림 1) 최근에는 금속 장벽을 사용하는 SNS 접합을 이용하여 집적도를 높이는 적층형 조셉슨 접합을 이용한 전압표준소자가 발표되어 가까운 장래에 보급되면 기존의 전압표준소자를 대체하리라 예상한다. 현재 가장 집적도가 높은 조셉슨 소자는 미국의 NIST와 일본의 AIST가 발표한 약 300,000개 이상의 조셉슨 접합이 집적된 10 V 프로그래머블 조셉슨 전압표준소자이다.

Nb 기반의 조셉슨 접합의 제작 기술은 현재도 급속히 발전하고 완성되어가고 있으며, 이를 이용한 초고속 디지털 회로 등의 다양한 형태의 고집적 소자의 출현이 예상되고 있다.

SQUID 응용

SQUID(Superconducting QUantum Interference Device: 초전도 양자간섭소자)는 기본적으로 조셉슨 접합과 초전도 고리(loop)로 구성되어 있으며, 조셉슨 효과, 자속 양자화, 마이스너 효과를 이용한 자속-전압 변환소자이다. 초전도 고리에 조셉슨 접합이 1개 있는 RF SQUID와 조셉슨 접합이 2개 있는 DC SQUID가 대표적인 형태이다. 자속이 SQUID에 가해지면 SQUID는 비례하는 전압신호를 발생시킨다. 따라서 자속

REFERENCES

- [2] M. Gurvitch *et al.*, Appl. Phys. Lett. **42**, 472 (1983).

으로 변환될 수 있는 임의의 물리량은 SQUID를 이용하여 정밀측정이 가능하며, 대표적으로 자기장 센서로의 활용을 들 수 있다. 대표적인 예로서, 시료의 자기투자를 측정에 사용되는 SQUID susceptometer(MPMS)가 이미 국내에도 여러 연구실에서 다양하게 활용되고 있다.

SQUID에 사용되는 초전도체의 종류에 따라 YBCO계로 대표되는 고온 초전도 SQUID와 Nb를 이용한 저온 초전도 SQUID로 나눌 수 있다. 고온 초전도 SQUID는 SrTiO_3 bicrystal 기판에 제작되며 자력계로 제작되었을 때 약 $10 \sim 30 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 감도를 가진다. 고온 초전도 SQUID는 아직까지는 제작 수율이 낮고 장시간 사용에 대한 신뢰성이 부족하므로 필요한 센서의 개수가 적은 소규모 응용분야에 적합하다. 반면 액체질소를 사용하여 측정 장치의 이동성이 좋으므로 야외에서도 사용이 가능하다. 고온 초전도 SQUID는 검출코일이 SQUID와 같은 기판에 주로 단일층 박막으로 제작되며, 임의 형태의 검출코일 혹은 임의의 입력신호를 형성하기에 불리한 점이 있다.

Nb SQUID는 실리콘 웨이퍼 등에 소형 칩 모양으로 제작되며, 자기장, 전류, 전압, 저항, 변위, 온도 등을 측정할 수 있도록 다양한 입력코일을 형성시킬 수 있다. 조셉슨 접합은 주로 Nb/ AlO_x /Nb 샌드위치 형태의 접합으로 제작되는데, 고진공 스퍼터링, 건식 식각, 절연막증착, 저항 및 배선 증착공정으로 이루어진다. SQUID의 고유잡음은 원리적으로는 인덕턴스, 정전용량 등에 의해 결정되지만 조셉슨 접합의 특성, 즉, 누설전류와 정전용량(접합의 크기)이 중요하게 작용한다. SQUID 고리의 크기를 마이크로미터 수준으로 작게 할 경우에는 마이크로 혹은 나노 브리지 형태의 접합을 이용하는데, Nb 박막 증착 후 집속이온빔(FIB)으로 식각하여 패턴을 형성한다.

SQUID의 대표적인 응용분야는 생체자기신호 측정으로 뇌 또는 심장의 전기활동에 의해 발생하는 자기장을 측정하여 의료진단에 응용하는 것이다. 생체자기 측정 시스템은 SQUID 센서장치, 구동회로, 냉각장치(dewar), 자기차폐실, 신호수집 및 분석 소프트웨어 등으로 구성된다. 뇌자도 신호를 측정하는데에는 헬멧모형의 센서 어레이와 액체헬륨 용기가 필요하며, 머리전체를 커버하기 위하여 100개 이상의 위치에서 SQUID가 배치된다. 뇌자도 기술을 이용함으로써 간질발생부위의 국지화(위치추정), 수술부위의 뇌기능 분포 조사, 정신질환 진단, 인지기능 진단 등이 가능하므로 차세대 뇌기능 진단기술로 기대된다. (그림 2)

한편 심자도 장치는 센서배치가 평면으로 이루어져 있으며 60여 개의 센서로 구성된다. 심자도 측정을 통해 심근허혈 혹은 협심증 진단, 부정맥을 유발하는 비정상전류의 위치추정을 비침습적으로 할 수 있다. (그림 3)

SQUID의 고감도 특성을 이용하면 기존의 NMR 혹은 MRI

Fig. 2. Magnetoencephalography system to measure magnetic fields generated from neural electric activity. Helmet-shape SQUID array, SQUID electronics, magnetically shielded room and softwares are used to measure the MEG signals. (KRISS)

Fig. 3. Magnetocardiography system to measure magnetic field signals generated from electric activity of myocardium. (KRISS)

에 비해 이미징 자기장이 매우 낮은 극저자장 NMR/MRI 측정이 가능하다. 이미 마이크로 테슬라 수준의 자기장을 이용하여 손과 머리의 이미징에 성공한 결과가 보고된 바 있다. 흥미로운 것은 T_1 대조 이미지는 자기장을 낮출수록 해상도가 좋아지기 때문에 극저자장 MRI를 이용하면 연조직 암진단에 유용할 것으로 기대된다. 또한 극저자장 NMR 스펙트럼의 분해능은 1 Hz 이하로 우수하므로 J-coupling, fine structure 등을 연구하는 데 유용하다고 볼 수 있다.

SQUID는 저주파에서 다른 어떤 자기센서보다 우수한 감도를 가지므로, 비파괴검사에서 특히 우수한 특성을 가진다. 즉,

시편에 저주파 교류 자기장을 가하고 유도되는 전류를 매핑하여 시편의 국부적인 결함 등을 찾을 수 있다. 이때 주파수를 낮출수록 금속시료에서 skin depth가 길어지므로 다층구조 혹은 깊은 위치의 결함을 찾는데 SQUID의 저주파 감도특성을 이용하는 것이 유리하다. 또한 식품 (유제품, 육류 등) 속에 포함된 금속조각(주사기 바늘)의 검출, 배터리 등 전자부품에서 기존의 X-선 검사에서 보이지 않는 금속의 검출 등에도 사용되고 있다.

야외 시험장비로는 지하자원 탐사장치, 금속성 폭발물 탐지장치, 잠수함 탐지 등이 가능하다. 이들 야외용 장치에는 지구 자기장의 변동을 상쇄시키기 위한 보상 장치가 필요하다.

이외에도 아래에서 기술할 초전도 저온검출기에 응용하거나, SQUID의 초저잡음 특성을 이용하여 양자컴퓨터에 활용할 수 있는 양자증폭기로 응용하는 연구 등이 활발하게 진행되고 있다. SQUID의 응용범위는 사실상 무궁무진하며, 극한의 저잡음 환경이 요구되는 기초과학 연구에도 큰 역할을 하고 있다.

초전도 저온검출기

초전도 센서 기술을 기반으로 개발되고 있는 저온 검출기들은 높은 에너지 분해능과 높은 측정효율, 낮은 검출하한(threshold) 등의 장점을 가지고 있으며, 테라헤르츠파부터 γ -선까지, 즉, meV에서 MeV 에너지 영역에 이르는 매우 넓은 범위에서 작동되는 뛰어난 성능을 보이고 있다.

저온검출기는 일반적으로 1 K 이하의 극저온에서 작동하며, 낮은 온도에서 나타나는 초전도 성질, 작은 열용량 또는 적은 열적 잡음 등의 이점들을 활용하여 측정의 극한에 도달하는 기술이다. 대표적으로 TES(Transition Edge Sensor: 초전도 상전이센서)와 MMC(Metallic Magnetic Calorimeter: 자기양자센서) 등이 있다. 앞에서 언급한 초전도 저온검출기는 검출하는 에너지 전부를 열에너지로 변환하여 수반된 온도변화를 측정하는 개념인 calorimetric detection을 기본원리로 한다. 이는 측정 에너지의 100%를 측정 수단으로 변환시키는 것으로 평형검출기(equilibrium detector)라고 부른다.

저온검출기는 그림 4와 같이 흡수체와 온도계로 구성되며 1 K 이하의 저온환경에 열접촉시킨다. 검출하고자 하는 입자(단일광자: 적외선 ~ γ -ray, 전자, 암흑물질 등)가 흡수체와의 반응으로 에너지를 전달하면 순간적인 온도 변화가 유발되고 이때의 온도 변화를 초전도 검출기를 이용하여 정밀하게 측정하는 원리이다.

초전도 물질은 초전도-금속 상전이에서 온도에 따라 급격한 저항변화 특성을 갖는다. 이를 이용하여 작은 온도 변화에 민

Fig. 4. (A) Principle of low temperature detector (calorimetric detection) (B) Photographs of TES (top) and MMC (bottom) detectors.

감한 온도센서로 이용하는 것이 TES(초전도상전이센서)이다. TES는 초전도 임계온도의 조절을 위하여 초전도물질과 금속의 이중박막을 증착하여 만들며, 그 위에 금속 흡수체를 올려 검출기를 제작한다. TES에 전압을 인가한 후, 온도 변화에 따른 전류의 변화를 SQUID를 이용하여 측정하고, 흡수된 에너지 값을 구한다. 현재 발표된 TES의 최고 에너지 분해능은 6 keV X-선에 대하여 1.6 eV이며^[3] 저온검출기 센서로 가장 널리 쓰이고 있다.

MMC(자기양자센서)는 상자성체의 자화(magnetization)가 온도에 따라 변하는 성질을 이용한 저온검출기이다. MMC에서는 검출기 성능의 핵심인 열평형 상태에 빨리 도달하기 위하여 금을 주 물질로 사용하여 빠른 온도 변화에 민감하게 하고, 어븀(Er)을 100 ~ 1000 ppm으로 도핑하여 낮은 온도에서도 상자성을 갖는 물질인 Au:Er를 사용한다. 일정 자기장 하에서 단일광자 흡수로 인한 온도 변화는 Au:Er의 자화 변화를 유발하며, 이를 SQUID를 이용하여 측정하여 흡수된 에너지를 측정한다. MMC는 TES와는 달리 임계온도가 없으므로 측정 온도에 크게 구애받지 않으며, 자기장의 세기, 어븀 도핑농도 등을 변화시킬 수 있기 때문에 여러 측정조건을 가질 수 있다. 에너지 분해능은 현재 6 keV X-선에 대하여 최고 2.7 eV의 분해능이 보고되었다.^[4]

이 외에 비평형검출기(non-equilibrium sensor)로서 빛이 초전도체에 흡수될 때 쿠퍼쌍이 깨지면서 만들어지는 준알갱이(quasiparticle)들이 터널링하면서 내는 전류를 측정하여 광자를 측정하는 STJ(Superconducting Tunnel Junction) 검출기와, 초전도박막을 이용한 high-Q 공진기를 이용하여 광자의 흡수에 의한 kinetic inductance의 변화로 생기는 임피던스 변화를 측정하는 KID(Kinetic Inductance Detector) 검출

REFERENCES

- [3] S. R. Bandler *et al.*, LTD-14, Heidelberg (2011).
- [4] L. Gastaldo *et al.*, LTD-12, Paris (2007).

Fig. 5. (A) Comparison of ^{241}Am alpha-spectrum measured by commercial detector(SBD) and the superconducting detector (MMC). (KRIS)

기가 있다. 이 검출기들은 특히 자외선 이하 에너지 영역 광검출기로서 장점이 있어서 많은 연구가 이루어지고 있으며, 인공 위성, 전파망원경 등에 응용되고 있다.

저온검출기는 넓은 에너지 영역에서 뛰어난 검출 능력을 가지므로 기존 측정의 정밀도를 높이거나, 이제까지는 불가능했던 영역의 측정을 가능하게 하여 새로운 연구를 가능하게 한다. 여기에서 저온검출기가 응용되는 예를 간단히 살펴본다.

높은 에너지 분해능을 이용한 X-선 스펙트럼 정밀측정을 기존의 EDS 측정에 활용하면 기존에는 불가능했던 정밀한 원소의 분석이 가능하게 된다. 또한 핵연료와 핵무기에 사용되는 우라늄과 플루토늄은 매우 다양한 동위원소를 가지고 있는데, 현재 사용되는 고순도-Ge 검출기로는 동위원소들이 방출하는 고에너지 감마선의 에너지 위치가 근접한 경우에 그 동위원소들을 구분하기 어렵다. 이에 비해 저온검출기는 20~30배 좋은 에너지 분해능을 보이고 있어, 고분해능의 핵물질 분석이 가능하여 핵연료 연구, 환경 방사능 측정, 핵물질 검증을 통한 국제 평화유지 등 경제사회적, 전략적인 응용에 활용 가능하다. 그림 5는 MMC 기반의 저온검출기를 활용한 알파스펙트럼 측정 결과의 예이다.

한편으로 단백질 같은 고분자 물질의 질량 분석은 바이오산업 발달에 필수적인 정보를 제공하는데, 초전도 검출기에서는 분자의 질량에 무관하게 100%의 검출효율을 갖는 이상적 검출기를 제작할 수 있어, 기존의 질량분석 장비가 질량이 큰 분자에서 효율이 떨어지는 문제를 해결할 수 있다.

초전도 저온검출기는 중성미자의 질량을 측정하는 실험에도 응용되고 있다. 즉 베타붕괴 때에 나오는 전자의 운동 에너지 최대값을 정밀 측정하여 중성미자 질량을 직접적으로 결정하려는 실험이 초전도 저온검출기를 이용하여 진행 중이다. 이중 베타붕괴를 측정함으로써 중성미자의 질량과 성질을 연구하는

Fig. 6. Photomicrograph of a coupled superconducting qubit device. From ref. [8].

실험도 초전도 저온검출기를 이용하고 있다. 또한 암흑물질에 관한 연구에도 고분해능과 낮은 검출하한의 이점을 이용한 초전도 저온검출기가 활용되고 있다.

이 외에도 광통신용 적외선인 $1.55\ \mu\text{m}$ (0.8 eV) 파장의 단일광자를 암전류(dark current)가 없는 텅스텐(W) TES로 측정하면 90% 이상의 양자검출효율(quantum efficiency)을 얻을 수 있다. 이러한 저온검출기는 양자광학실험에 이미 적용되고 있으며, 양자암호전송 등의 연구에 활용되고 있다.

초전도 큐비트와 양자컴퓨터

초전도체가 보이는 거시적인 양자현상을 활용하여 과연 어떠한 양자측정을 할 수 있을 것인가에 대한 논의는 매우 흥미로운 주제이다.^[6] 양자컴퓨터가 소인수분해 문제를 매우 효과적으로 풀 수 있음이 알려진 이후, 양자컴퓨터를 구현하기 위한 다양한 방식의 큐비트(qubit) 연구가 진행되어 왔으며, trapped ion, quantum dot, photon 등과 더불어 초전도체를 이용한 거시적 양자역학적 상태 구현이 전자소자를 이용한 유망한 큐비트(qubit) 후보로서 제안되었다.

1999년 일본의 NEC팀이 쿠퍼쌍 박스를 이용한 라비진동(Rabi Oscillation)을 Nature지에 보고한 이후^[7] 초전도 조셉슨 소자를 이용한 큐비트 연구는 지난 10년간 활발한 연구를 통해 엄청난 발전을 이루었다. 대표적인 지표로서 큐비트를 물

REFERENCES

- [5] D. Rosenberg *et al.*, Phys. Rev. A **71**, 061803R (2005).
- [6] A. J. Leggett, Prog. Theor. Phys. (Suppl.) **69**, 80 (1980).
- [7] Y. Nakamura *et al.*, Nature **398**, 786 (1999).

리적으로 구현하는데 가장 중요한 요소인 결맞음 시간(T_1)은 1999년 당시 2 ns에서 2011년 현재 200 μ s까지 10^5 배 이상 증가하였으며, 초전도 큐비트의 제어 및 작동에 관한 많은 지식이 축적되어 소자의 디자인과 측정기법에서 비약적인 발전이 있었다. 최근에는 3개의 큐비트를 조작하여 얽힘 상태를 구현한 결과가 발표되었으며,^[8,9] 간단한 양자 알고리즘의 구현도 보고되었다(그림 6). 현재 미국의 IARPA는 2014년까지 양자컴퓨터 기술을 확보하는 것을 목표로 대규모 국가 프로젝트를 진행 중이며, 초전도 큐비트 연구가 그 중에서 큰 부분을 차지하고 있다.

조셉슨 접합을 기본으로 하는 초전도 큐비트는 그 작동방식에 따라서 charge qubit, phase qubit, flux qubit 등으로 분류되며, 연구가 진행됨에 따라서 각 큐비트 방식의 장단점을 서로 보완한 하이브리드 형태의 큐비트 형태들이 계속 개발되고 있는 경향이다. 또한 예일대학 팀을 중심으로 초전도 마이크로파 공진기와 큐비트를 결합한 Circuit QED라는 분야가 발달하여 예전에는 원자를 조작하여 수행하던 QED의 양자역학적 실험들을 전자소자 상에서 구현할 수 있는 방법이 열렸다.

초전도 큐비트는 전자소자의 특성상 외부환경과 상호작용이 크기 때문에 결맞음 상태를 무한히 오래 지속하기 어려운 점이 있지만, 한편으로 바로 같은 이유 때문에 다양한 양자상태의 조작이 가능하다는 점이 장점이 된다. 또한 다른 양자시스템과의 결합을 통하여 양자시스템의 상태를 큐비트를 매개로 하여 조작하고 관찰할 수 있는 물리적으로 중요한 양자역학 실험 도구가 된다. 최근에는 나노역학계와 초전도 큐비트를 결합하여 나노역학계의 양자기저상태를 조작하고 관찰한 결과가 UCSB 연구팀에 의하여 보고되었다.^[10]

초전도 큐비트는 양자컴퓨터를 구현하는 핵심 요소이며, 한편으로 전자소자에서 양자역학적 시스템을 구현할 수 있는 매우 흥미로운 물리학적 연구대상이다. 양자역학 및 양자측정의

여러 가지 물리적 이론들을 손톱만한 전자칩 위에서 구현하는 다양한 양자역학 실험으로 해결할 수 있다는 가능성만으로도 물리학 연구자들에게 충분히 흥미로운 연구주제를 제시하고 있다.

나오는 글

초전도체는 그 근본원리의 규명 자체만으로도 모든 물리학자에게 영원한 매력을 유지하는 연구의 대상이지만, 그 응용방면의 다양함과 혁신성으로 인해서도 그 중요성이 더욱더 강조된다. 초전도체를 이용한 전자소자의 응용은 기초과학으로부터 실용적 응용까지 넓은 범위에서 매우 다양한 형태로 이루어지고 있다. 이 짧은 글에서 모든 전자소자의 응용을 살펴보기에는 지면이 턱없이 부족하지만, 조셉슨 소자의 응용과 양자전압표준, SQUID 응용, 저온검출기, 그리고 초전도 큐비트에의 응용 및 연구방향을 대표적으로 살펴보고, 그 기술적 현황과 전망을 살펴보았다. 초전도 센서는 기존의 어떠한 시스템에서도 구현하지 못한 초정밀 측정을 가능하게 하여 새로운 연구의 가능성을 열고 있으며, 의료, 우주, 천체, 국방, 기초연구 등의 다양한 분야에서 활용되고 있다. 특히 초전도 전자소자는 거시적 양자역학 현상을 전자소자에 직접적으로 응용하는 양자소자 응용이 주축을 이루는데, 이는 인류의 지성이 창조해낸 순수한 기초학문의 아이디어가 어떻게 현실적인 응용기술로 구현되는가에 대한 프로세스의 관점에서 매우 흥미로운 주제라고 할 수 있다.

REFERENCES

- [8] M. Neeley *et al.*, Nature **467**, 570 (2010).
- [9] L. DiCarlo *et al.*, Nature **467**, 574 (2010).
- [10] A. D. O'Connell *et al.*, Nature **464**, 697 (2010).