암페어의 재정의와 실현 방법에 대한 소개

DOI: 10.3938/PhiT.27.008

김남·배명호·안예환·김완섭·채동훈·정윤철

Brief Review of the Redefinition and Realization of the Ampere

Nam KIM, Myung-Ho BAE, Ye-Hwan AHN, Wan-Seop KIM, Dong-Hun CHAE and Yunchul CHUNG

So far, inconsistency has existed between the definition of the ampere in SI units and its realization. For instance, the ampere is defined on the basis of the classical Ampere's law while it is realized through Ohm's law, that is, the ratio of the Josephson voltage to the quantum Hall resistance, neither of which is an SI unit. However, in the revised SI units to take effect on May 20, 2019, World Metrology Day, the ampere will be defined as the flow of electrons with the nu-

merical value of the elementary charge e fixed. Thus, all three electrical units, the ampere, the volt and the ohm, will be defined on the base of quantum physics. As a candidate for the quantum current standard, a semiconductor-based quantum-dot single-electron pump device is reviewed mainly in relation to the redefinition and realization of the ampere.

들어가는 말

국제단위계(SI)의 기본단위 재정의의 앞두고 기본 단위의 하나인 암페어의 재정의에 대해서 소개한다. 또한, 이를 실현하기 위한 현재까지의 연구 개발 현황을 간단히 짚어보겠다. 구체적으로는 양자 전류원의 개발현황, 작동 원리 및 정밀측정 방법에 대하여 약술하겠다. 소자 특성평가 및 정밀측정 방법에 대한 자세한 기술은 KRISS의 연구 결과를 기초로 하였고,^[1] 본 원고는 참고문헌 [1]에 기초하였음을 밝힌다. 특히 게재된 그림은 참고문헌 [1]의 것을 대부분 차용하였다.

현재의 전류 단위 암페어

현재의 암페어 단위 정의는 1948년도 제9회 국제도량형총회(CGPM)에서 결정되었는데 다음과 같이 고전전자기학인 암페어의 법칙에 기초하여 정의되어 있다(그림 1(a) 참고); '1 암페어는 무한히 길고 무시할 수 있을 만큼 작은 원형 단면적을 가진 두 개의 평행한 직선 도체가 진공 중에서 1 미터 간격으로 유지될 때 두 도체 사이에 매 미터당 2×10^{-7} 뉴턴의 힘을 생성하는 일정한 전류의 크기이다.'^[2] 그러나 이와 같이 비현실적인 정의를 실현하는 것은 매우 복잡하고 어려워져 불확

저자약력

김남 박사는 포항공대 물리학과에서 박사학위(1999)를 취득한 후, 핀란드 위배스킬레 대학교에서 박사후연구원을 거쳐 2002년부터 한국표준과학연구원 연구원에 근무하고 있으며, 현재 전자기표준센터에서 단전자 펌프 소자를 이용한 양자 전류 표준 실현에 관해 연구 중이다.(namkim@kriss.re.kr)

배명호 박사는 포항공대 물리학과에서 박사학위(2006)를 취득한 후, 어바나-삼페인 일리노이 주립대학교 박사후연구원을 거쳐 2012년부터 한국표준과학연구원 연구원에 근무하고 있으며, 현재 전자기표준센터에서 단전자 펌프 소자를 이용한 양자전류 표준 실현에 관해 연구 중이다.(mhbae@kriss.re.kr)

안예환 연구학생은 고려대학교에서 석사학위(2011)를 취득한 후 한국표준과학연구원 박사과정 학연연구학생으로 근무하고 있으며, 현재 단전자 펌프 소자의 전자 수송 메커니즘을 연구 중이다.(muta0719@kriss.re.kr)

김완섭 박사는 뒤스부르크(Duisburg) 대학에서 박사학위(1998)를 취득한 후, 표준연 박사후연구원을 거쳐 2002년부터 한국표준과학연구원 연구원에 근무하고 있으며, 현재 전자기표준센터에서 저전류, 양자저항, 임피던스표준에 관해 연구 중이다.(ws2kim@kriss.re.kr)

채동훈 박사는 오스틴 소재 텍사스 주립 대학에서 박사학위(2006)를 취득한 후, 막스플랑크 연구소(Max Planck Institute for Solid State Research)에서 박사후연구원을 거쳐 2012년부터 한국표준과학연구원 연구원에 근무하고 있다. 현재 전자기표준센터에서 양자홀 저항을 이용한 양자 전류-전압 변환기 개발 및 양자임피던스 표준을 개발하고 있다.(dhchae@kriss.re.kr)

정윤철 교수는 고려대학교에서 박사학위(1995)를 취득한 후, 옥스포드 대학 및 와이즈만 연구소 박사후연구원을 거쳐 2003년부터 부산대학교 물리학과에 근무하고 있으며, 현재 이차원 전자계의 양자 수송 현상에 관해 연구 중이다.(ycchung@pusan.ac.kr)

REFERENCES

- [1] Nam Kim, Myung-Ho Bae, Ye-Hwan Ahn, Wan-Seop Kim, Dong-Hun Chae, Changki Hong and Yunchul Chung, J. Korean Soc. Precis. Eng. 35, 385 (2018).
- [2] The International System of Units(SI) [8th edition, 2006; updated in 2014], published by BIPM. <http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/>.

Fig. 1. (a) Left: Schematic diagram illustrating the definition of ampere. Right: the implementation of the ampere in SI units. The ampere is implemented by the combination of the ohm and the volt, which are derived from the kilogram, the meter and the second. (b) a diagram illustrating the realization of the revised ampere.^[3]

도 개선도 쉽지 않다. 현실에서 암페어를 구현하는 방법은, 그림 1(a)에서 묘사되어 있듯이, 저항 단위(옴, ohm) 및 전압 단위(볼트, volt)의 비례관계(Ohm's law)를 이용하는 것이다. 이처럼, SI 기본 단위임에도 암페어는 질량, 길이 및 시간 단위 등에 의존하여 구현 또는 실현되도록 정의되어 있어서 표준의 소급성이 복잡해지는 근본적인 문제점을 갖고 있다. 반면에, 유도 단위인 볼트와 옴의 정의는 1987년도 CGPM에 의해서 조셉슨 전압과 양자 홀저항으로 새롭게 채택되었다. 결과적으로 암페어의 정의는 SI 단위이고 옴 및 볼트의 단위는 특별히 양자 전기표준기에 기초하여 정의되었기 때문에 전기 단위계가 일관성이라는 측면에서 개선될 필요가 있었는데 암페어 재정의 를 통해서 일관성이 확보되게 된다.

암페어의 재정의

이와 같이 암페어의 정의와 실험실에서의 실현이 일치하지 않은 점, 그리고 기본단위임에도 타 단위의 측정표준의 지원이 필요한 점 등 때문에 암페어 단위의 정확성을 검증하고 유지 하는 것은 많은 노력이 요구되는 일이다. 또한 정확도도 타 양자 전기표준기와 비교해서 10배 이상 나쁘다. 이와 같은 문제 점을 해소하고 타 양자 전기표준기와와의 일관성을 향상시키기 위해서, 기본 물리상수에 기초한 암페어 단위 재정의의 필요성은 오래전부터 제기되어 왔다. 예컨대, 2005년 국제도량형위원회

(CIPM)에서 기본전하 e 를 이용한 암페어 재정의의 준비하기 시작하였고, 향후 2019년도에 재정의가 선포될 예정이다. 재정의될 암페어는 기본전하를 물리 상수로 고정하고($e = 1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C), $A = e / (1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ s)로 정의하게 된다.^[4] 즉 1 암페어는 1 초당 $6.241\ 509\ 07 \times 10^{18}$ 개의 기본 전하의 흐름에 해당하는 전류이다. 새로운 암페어의 정의는 기본전하 물리상수에 근거하기 때문에 정의 자체의 모호성이 사라졌고, 시간 단위 초(s)에만 의존하여 정의되었으므로 논리적인 측면에서 매우 단순해지고 일관성이 향상되었다(그림 1(b) 참조). 그러나 현재까지 새로운 암페어 단위를 실현할 수 있는 양자 전류표준기는 확립되지 않은 상태다.

재정의 암페어의 실현

양자 전류표준기 개발을 위한 연구는 과거 20여 년 동안 표준기관을 중심으로 지속적으로 진행되었다. 현재까지 가장 강력한 양자 전류표준기 후보는 양자점(quantum dot, QD) 기반의 단전자 펌프 소자이다. 단전자 펌프 소자는 날개의 전자를 한 개씩 외부 주파수에 동조하여 소스 전극에서 드레인 전극으로 이송하는 소자를 일컫는다. 그림 2에 묘사되어 있듯이, 양자점과 같은 나노스케일의 작은 소자에서는 전자의 쿨롱 에너지(E_c)를 무시할 수 없고 이를 극복해야 전자의 양자점 투과가 가능한 '단전자 투과 현상(SET 현상)'이 발생한다. 이를 이용하면 전자를 한 개씩 제어하는 것이 가능해지고 더 나아가서 게이트에 rf 신호를 인가하여 주파수 f 빈도로 전자를 한 개씩 이송하여 $I = ef$ 의 전류를 발생하는 것이 가능해진다.

단전자 펌프 소자를 이용하여 발생시킬 수 있는 최대 출력은 인가하는 rf 주파수에 의존하는데, 현재까지 개발된 소자의 출력은 1 nA 이하이다.^[1] 향후로도 단전자 펌핑 방식으로 1 A를 직접 실현하는 것은 불가능하다고 예상된다. 그러나 단전자 펌프소자를 이용한 양자 전류표준기 개발이 갖는 의미는 다음과 같다. 첫째로 비록 출력은 1 nA 이하로 작지만 10^{-8} 수준의 정확도가 달성되면 극소 전류 영역에서 재정의에 입각한 양자 전류표준이 실현되었다고 공인될 수 있다. 또한 양자 전류표준기와 조셉슨 전압표준기, 양자홀 저항표준기 등 세 개의 서로 다른 양자 전기표준기 상호간의 일치성을 검증할 수 있

REFERENCES

- [3] Ye-Hwan Ahn, "Single-electron pump based on GaAs/AlGaAs quantum dot," submitted as Ph.D. Thesis, Department of physics, Korea University (2018).
- [4] D. B. Newell, F. Cabiati, J. Fischer, K. Fujii, S. Karshenboim, H. Margolis, E. de Mirandes, P. Mohr, F. Nez, K. Pachucki, *et al.*, *Metrologia* **55**, L13 (2018).

Fig. 2. (a) Illustration for a single electron tunneling (SET) device. (b) An electron tunneling is blocked due to the charging gap energy E_c . (c) Electrons can tunnel through the QD when energy levels are aligned with the Fermi level of the electrodes.^[1,5]

는 기회를 제공하게 된다. 이와 같은 일치성 검증 실험은 Quantum Metrology Triangle(QMT) 검증 실험이라고 불리는데, QMT 일치성이 확인되어야, 양자 전류표준기가 조셉슨 전압표준기, 양자홀 저항표준기와 함께 정당성을 확보하게 되는 것이다. 자체의 정당성도 강화될 뿐만 아니라 상호간의 옴의 법칙을 이용한 전류표준기의 정당성도 보장받게 된다. 한편, 과학적인 관점에서는 양자홀 효과, 조셉슨 효과 및 단전자 투과 효과 등 각기 다른 세 개의 물리 이론이 QMT 측정 불확도 이내에서 정확하다는 검증도 가능하게 된다.

양자전류원의 개발 동향

그림 3은 각국의 연구 기관별로 개발 중인 양자점 기반 단전자 펌프 소자의 사진이다. 반도체 양자점 기반 단전자 펌프는 유럽의 표준기관(NMI)을 중심으로 활발히 연구되는 분야이다. 과거 20년 동안 연구가 진행되었는데, 현재까지 개발된 최고의 양자 전류원 출력과 정확도 수준은 다음과 같다; 출력 ~ 100 pA, 불확도 $\sim 2 \times 10^{-7}$. 여기서 불확도는 반복하여 측정된 값의 통계적 의미의 표준편차를 뜻하는데, 더 자세하게 말하면, 측정되는 양자전류원 출력을 I 라고 할 때, $(I - ef)/ef$ 측정값의 통계적인 표준편차(σ)를 뜻한다. 즉, 양자전류원의 출력이 $[100 \times (1 \pm 2 \times 10^{-7})]$ pA일 확률은 68%라는 뜻이다. 보다 엄밀한 불확도 정의에 대해서는 참고문헌 [1]을 참조한다. 정밀 측정 결과를 근거로 단전자 펌프 소자의 보편성이 일부 검증되었다고 믿고 있다. 왜냐하면, 각 기관의 펌프 소자의 구조와 재질은 모두 다르고 제작 방법도 상이하지만 동일한 물리 이론으로 펌핑 현상이 설명되고 정확도도 비슷한 수

Fig. 3. Various types of single electron pumps; GaAs/AlGaAs-based quantum dot pumps by KRIS, PTB and NPL (upper panel). Si-based QD pumps by NTT and UNSW. Superconductor-normal metal hybrid pump by MIKES (lower panel).^[1,6-12]

준에서 측정되고 있기 때문이다. 다음에 설명되겠지만, 소자의 작동 안정성도 검증되었기 때문에 단전자 펌프소자가 양자 전류표준기로서 개발되는데 있어서 한 단계 진보가 있었다고 말할 수 있다. 또한 그림 4를 살펴보면 단전자 펌프 소자의 불확도가 해마다 빠르게 개선되고 있음을 알 수 있다.

REFERENCES

- [5] B. K. Kim, "Quantum Dots and Kondo-correlated Andreev Bound States in Single-wall Carbon Nanotubes," Ph.D. Thesis, Department of physics, Chonbuk National University (2014).
- [6] S. Giblin, M. Kataoka, J. Fletcher, P. See, T. Janssen, J. Griffiths, G. Jones, I. Farrer and D. Ritchie, *Nature Communications* **3**, 930 (2012).
- [7] M.-H. Bae, Y.-H. Ahn, M. Seo, Y. Chung, J. Fletcher, S. Giblin, M. Kataoka and N. Kim, *Metrologia* **52**, 195 (2015).
- [8] F. Stein, H. Scherer, T. Gerster, R. Behr, M. Götz, E. Pesel, C. Leicht, N. Ubbelohde, T. Weimann, K. Pierz, *et al.*, *Metrologia* **54**, S1 (2016).
- [9] G. Yamahata, S. P. Giblin, M. Kataoka, T. Karasawa and A. Fujiwara, *Scientific Reports* **7**, 45137 (2017).
- [10] R. Zhao, A. Rossi, S. Giblin, J. Fletcher, F. Hudson, M. Möttönen, M. Kataoka and A. Dzurak, *Physical Review Applied* **8**, 1 (2017).
- [11] V. F. Maisi, Y. A. Pashkin, S. Kafanov, J.-S. Tsai and J. P. Pekola, *New Journal of Physics* **11**, 113057 (2009).
- [12] KRIS, PTB, NPL, NTT, UNSW and MIKES represent, Korea Research Institute of Standards and Science, the National Standards Laboratory of Germany, National Physical Laboratory (UK), Nippon Telegraph and Telephone, University of New South Wales (Australia), and Centre for Metrology and Accreditation (Finland), respectively.

Fig. 4. Progress of single electron pumps. SAW and SINIS represents surface acoustic wave and superconductor - insulator - normal metal - superconductor junction, respectively.^[1]

Fig. 5. Sequence of quantized electron pumping process in time. Pumping process repeats the loading, capturing and unloading stages as the entrance potential barrier modulates as a function of time. $\Gamma_{L(R)} \propto \exp(\pm \beta_{L(R)} t)$ where $\beta_{L(R)}$ is a barrier-shape dependent parameter.^[1,13]

양자전류원의 동작 원리

대표적인 단전자 펌프 모델을 설명하고자 한다. 이 모델은 앞서 예시한 양자점 단전자 펌프 소자에 적용되는 모델이다. 그림 5에 펌프 작동원리가 도식적으로 묘사되어 있다. 각 기관별 소자의 구조 및 물성은 각각 다르지만, 작동 원리는 다음과 같이 동일하다. 시간에 따라 순차적으로 전자가 적재(loading), 포획(capture), 그리고 방출(unloading) 과정을 거치면서 전자가 소스 전극에서 드레인 전극으로 이동된다. 양자점의 출구 포텐셜을 고정된 상태에서 입구 포텐셜을 제어하는 입구 전압 (V_{ent})을 rf 신호로 주기적($T=1/f$)으로 변조하면 전자가 한 개씩 순차적으로 동기되고, 소스 전극에서 드레인 전극으로 양자화된 전자가 전송되어 직류 전류 $I=ef$ 를 발생시킨다. 이때

Fig. 6. Left: schematic diagram showing back-tunneling process during the capturing stage. Γ_1 and Γ_2 denote decay rate of 1 and 2 electron number state, respectively. Right: an example of fitting the decay-cascade model Eq. (1) (red solid line) to experiment data.^[1,11,12]

중요한 점은, 전자의 적재 및 방출 과정에서는 전자가 전극과 에너지적으로 평형 상태가 유지되어야 하고, 포획단계에서는 비평형상태(non-adiabatic)가 유지되어야 양자화된 전자가 펌핑될 수 있다. 이와 같은 조건이 만족되려면, 적재 및 방출 단계에서는 $hf \ll \Gamma_L$, $hf \ll \Gamma_R$ 조건을 각각 만족해서 양자점의 전자가 전극과 평형상태를 유지해야 한다. 또한 포획 단계에서는 $hf \gg \Gamma_L$ 조건이 만족되어서 양자점에 포획된 전자가 소스 전극으로 투과 붕괴되지 않고 유지되어야 한다. 여기서 Γ_L , Γ_R 은 각각 전자의 소스 및 드레인 전극으로의 투과율을 나타낸다. 그림 5는 $\log \Gamma(t)$ 곡선에서 이와 같은 조건을 만족시킬 때 적재, 포획(t_L) 및 방출되는 순간(t_U)을 묘사하고 있다.

그림 6은 단전자 펌핑 현상을 설명하는 붕괴하강 모델(decay cascade model)의^[14] 핵심 개념인 후방 투과율(back-tunneling rate)을 묘사하고 있다. 이 이론 모델에 의하면, 단전자 펌핑에 의한 출력 전류(I_{pump})는 출구 포텐셜 전압 V_{exit} 의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \langle n \rangle &= I_{\text{pump}} / ef \\ &= \exp[-\exp(-aV_{\text{exit}} - b)] \\ &\quad + \exp[-\exp(-aV_{\text{exit}} - b + \delta_2)] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 a , b 는 게이트 전압의 전환변수 및 오프셋 값이고 δ_2 는 피팅 파라미터이다. 여기서 δ_2 는 첫 번째 전류 고원의 평평도 또는 펌핑 에러율과 관련된 성능지표이다. 모델에 의하면 $\delta_2 = \log(\Gamma_2/\Gamma_1)$ 으로 표현된다. 물리적으로 Γ_2 가 Γ_1 에 비해서 클수록 δ_2 값이 커진다. 이는 전자 2개 상태의 붕괴율이 클수록

REFERENCES

- [13] Y.-H. Ahn, C. Hong, Y.-S. Ghee, Y. Chung, Y.-P. Hong, M.-H. Bae and N. Kim, Journal of Applied Physics **122**, 194502 (2017).
- [14] V. Kashcheyevs and B. Kaestner, Phys. Rev. Lett. **104**, 186805 (2010).

Fig. 7. Left: pumping map of $dI_{\text{pump}}/dV_{\text{exit}}$ density plot as a function of V_{exit} and V_{ent} . Right: an example of pumped current as a function of V_{exit} at a fixed entrance voltage corresponding to the vertical dotted yellow line in the left panel.^[1]

전자 1개 상태가 안정적임을 뜻하므로, δ_2 크기는 전자 한 개의 펌핑의 정확도와 연관된 성능지표로 받아들여진다. 여기서 $\Gamma_{1(2)}$ 은 전자 1(2)개의 상태의 붕괴율을 나타낸다.

그림 6의 오른쪽 그림은 출구 게이트 전압에 의존하는 펌프 전류 곡선을 보여주고 있다. 앞에서 모델 식(1)을 전류 곡선에 피팅해서 δ_2 값을 구할 수 있다. 언급했듯이, δ_2 값은 극저온 정밀측정의 정확도 값과 일정한 연관성을 갖는다고 믿어진다. 예컨대 20 이상이면 정밀측정 정확도는 10^{-7} 수준으로 예측되고 실험적으로 일부 확인되었다.^[7] 따라서 이 모델을 이용하면 정밀측정(precision measurement) 전에 간단한 일반측정(normal measurement)을 통해서 단전자 펌프 정확도 값을 예측할 수 있다.

KRISS 양자전류원 개발 현황

KRISS 단전자 펌프는 GaAs/AlGaAs 이차원 전자계 기반의 양자점을 형성하기 위하여 금속 게이트를 이용하였다(그림 3 참조). 세 조의 양자점컨택(quantum point contact, QPC) 게이트로 구성되어 있어서, 두 조의 QPC는 양자점을 형성하고, 가운데 위치한 QPC가 양자점의 에너지 레벨을 조절하는 막대 게이트(plunger gate) 역할을 하도록 제작되었다. 양자점 에너지 레벨을 조절할 수 있는 또 하나의 게이트 ‘트렌치 게이트’가 3쌍의 QPC 게이트를 관통하는 1차원 금속 게이트 형태로 추가되어 있다. 트렌치 게이트는 에너지 레벨뿐만 아니라, 양자점과 전극 사이의 전자 투과율에도 관여한다. 즉, 트렌치 게이트에 양의 전압(V_T)을 인가하면 양자점의 포텐셜 우물을 더 깊게 만들어 양자점 에너지 준위의 간격을 증가시키고, 한편 전자의 투과율 상승도 유도한다. 참고로, 성능지수 δ_2 는 양자점 에너지 준위간격에 비례하는 특성이 있다.^[15] 펌프 측정 실험은 트렌치 게이트 전압을 +0.3 V 이상으로 인가한 상태에서 수행되게 된다. 각 게이트 전극의 선폭은 75 nm, 각 게이트 사이의 간격 또한 75 nm로 설계되었다.

Fig. 8. Relative deviation of I_p from ef , $\delta I / ef$ in ppm (parts per million) as a function of an offset gate voltage scale, ΔV_{exit} at $f = 0.7$ GHz under $B = 11$ T. The dotted line is a fitted line with Eq. (1).^[1,5]

단전자 펌프 소자의 펌핑 정확도 분석을 위한 정밀 측정 방법을 기술하기에 앞서서 일반측정 방법을 먼저 설명하겠다. 일반측정은 액체헬륨 온도 4.2 K에서 수행된다. 모든 게이트에 음의 전압을 인가하여 전자 채널이 완전히 닫히는 영역에서 각 게이트의 전압을 적절히 조절하여 전자의 펌핑 조건을 탐색한다. 이때, 입구 게이트(entrance gate)에 인가되어 있는 직류 전압에 rf 신호가 더해지면 주기 f 로 전자 펌핑이 진행되어서 유도되는 전류의 크기는 $I = nef$ 를 만족시킨다(여기서 n 은 자연수). 그림 7의 왼쪽 그림은 소위 ‘펌핑지도’(pumping map)라 불리는 측정 데이터이다. 입구 및 출구 게이트 전압을 변수로 펌핑된 전류 크기의 미분값($dI_{\text{pump}}/dV_{\text{exit}}$)를 2차원 그림으로 표현한 플롯인데, 빨간색 테두리로 둘러싸인 영역이 전류 고원(current plateau)이고 전류 고원 영역에 표시되어 있는 숫자는 펌핑된 전자의 개수를 나타낸다. 그림 7의 오른쪽 그림은 ‘펌핑지도’에 점선으로 표시된 단면 프로파일에 해당되는 펌핑 전류 곡선이다. 전류 고원 3개가 선명하게 보인다. 이때 사용된 rf 신호의 주파수 대역은 ~ 100 MHz였고, rf의 파워(P^{rf})는 -3 dBm $\sim +1$ dBm이었다.

KRISS 단전자 펌프의 정밀 측정은 KRISS와 NPL(영국 표준 기관) 공동으로 수행되었는데 아이디어는 간단하다. 기존의 표준기로부터 교정된 표준 전류 I_R 와 단전자 펌프의 전류 I_p 를 여러 번 반복적으로 비교 측정한 후 통계 처리하여 불확도를 산출하는 것이다.^[7] 상세한 정밀 측정 방법은 참고문헌 [1]을 참조하기 바란다.

그림 8은 KRISS 단전자 펌프의 정밀측정 결과를 보여준다. 결론적으로 단전자 펌프의 상대 불확도 $\delta I / ef$ 는 $\langle I_p - ef \rangle / ef \pm u_T = (-0.92 \pm 1.37) \times 10^{-6}$ 이다. 여기서 주파수 $f = 0.95$ GHz, 자기장 $B = 11$ T, 온도 $T = 0.3$ K, 총 불확도 u_T

REFERENCES

- [15] M. Seo, Y.-H. Ahn, Y. Oh, Y. Chung, S. Ryu, H.-S. Sim, I.-H. Lee, M.-H. Bae and N. Kim, Phys. Rev. B **90**, 085307 (2014).

$= \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)} \sim 1.37 \times 10^{-6}$. 시스템 불확도 $u_B = 1.2 \times 10^{-6}$ 이므로, 시스템 불확도 아래로 펌프 소자의 정확도 평가는 불가능하였지만, 최소한 시스템 불확도보다 작다는 것은 확인되었다.

단전자 펌프 소자가 양자홀 저항표준기와 조셉슨 전압표준기와 비견할 수 있는 양자 전류표준기로 공인되어 양자 전기 표준체계가 완성되기 위해서는 단전자 펌프의 불확도도 10^{-8} 수준이 유지될 수 있음이 검증되어야 한다. 현재의 정밀측정 기술로는 출력이 ~ 100 pA인 단전자 펌프 소자의 경우, 출력이 너무 낮아서 10^{-8} 불확도 검증이 불가능하다. 현재의 단전자 펌프 소자의 출력이 최소한 10배 이상 증가되어야 가능하다. 단전자 펌프 소자의 출력을 높이는 방법으로는 소자의 작동 주파수를 상승시키거나 소자의 병렬화 등 두 가지 방법이 있다. 이와 관련된 논의는 참고문헌 [1]을 참조하기 바란다.

양자측정 삼각체계

(Quantum Metrology Triangle, QMT)

새로운 전류 표준 즉 양자 전류표준기가 기존의 양자 전기 표준체계(조셉슨 전압 및 양자홀 저항표준)와 얼마나 일치하는가를 그림 9에 묘사된 검증 방법 즉 QMT 일치성 검증 방법을 통해서 검증해야 하는데 그 이유는 다음과 같다. 첫 번째는 그림에서 설명하고 있듯이 세 개의 양자 전기표준은 각각 다른 물리 법칙 즉 ‘단전자 투과 효과(SET effect)’, ‘조셉슨 효과(Josephson effect)’ 그리고 ‘양자홀 효과(quantum Hall effect)’에 근거하고 있는데 각각의 관계식을 나타내는 물리 공식이 얼마나 정확한지를 다음의 방법으로 점검한다. 단전자 펌프의 전류에 의해서 양자홀 저항 소자에 유도된 양자홀 전압 ($I_p \times R_H$)을 조셉슨 전압표준기로 측정된 전압 (V_J)과 비교함으로써, 인가된 전류(I_p)와 전압(V_J)의 비가 양자홀 저항(R_H)과 얼마나 정확히 일치하는가를 측정하여 물리법칙의 정확함을 확인할 수 있다. 이는 곧 3개의 양자 전기표준기의 상호 일치성을 검증하게 되는 것이다. 또 다른 이유는, 이렇게 QMT 검증 실험이 완료되면, 옴(Ohm)의 관계식을 이용한 양자홀 저항과 조셉슨 전압표준기로부터 유도된 전류표준을 양자 전류표준기로 활용할 수 있다. 즉 단전자 펌프를 이용하여 극소전류 영역에서 양자 전류표준기를 확립하고, 출력이 큰 영역에서는 옴의 법칙을 이용한 양자 전류표준 확립이 가능하다. 이 밖에 QMT 검증의 또 다른 의미는 물리상수 측정이라는 측면에서 다음과 같은 의미가 있다. 조셉슨 상수 $K_J = 2e/h$ 와 폰클리칭 상수 $R_K = h/e^2$ 그리고 기본전하 상수 $Q_s = e$ 에 대한 CODATA (2010)^[17] 불확도 불일치 이슈를 해소하는데 기여한다. 양자홀 효과, 조셉슨 효과 및 단전자 효과를 표현하는 상수의 관계식

Fig. 9. Quantum metrology triangle links the Josephson effect (JVS), the quantum Hall effect (QHR) and the single electron tunneling effect (SET) by using Ohm's law. Josephson voltage $V_J = f/K_J = hf/2e$, quantum hall resistance $R_H = R_K = h/e^2$, and single electron current $I_p = Q_s f = ef$.^[1,16]

이 ϵ_K , ϵ_J , ϵ_s 만큼 부정확하다고 가정하면, $K_J R_K Q_s - 2 = \epsilon_K + \epsilon_J + \epsilon_s$ 가 되고, 이 불일치 상수 값의 불확도가 $\sim 5 \times 10^{-7}$ 수준으로 산출될 수 있다는 문제 제기가 있었다.^[17] 이와 같은 예상보다 커다란 불일치 이슈에 대한 원인이 무엇인지 밝혀져야 한다.

QMT의 일치성 검증 실험은 영점검출기를 통하여 검증된다. 영점검출기는 단전자 펌프의 전류 $I_p = Q_s f$ 에 의해서 양자홀 저항 $R_H = R_K$ 에 유도되는 홀 전압 $V_H = I_p R_H$ 과 조셉슨 전압 $V_J = f/K_J$ 과의 차이를 측정한다. 여기서, Q_s , R_K , K_J 는 각각, 전자의 전하상수, 폰 클리칭 상수, 그리고 조셉슨 상수를 나타낸다. 영점검출기에서 δV 가 측정되면, 다음과 같은 관계식을 얻게 된다.

$$K_J R_K Q_s - 2 = \delta \quad (2)$$

여기서, $\delta \equiv \delta V \times K_J / f$ 로 재정의하였다. 즉 영점검출기 신호 δV 가 제로로 측정되면 위 식도 제로가 되어서 QMT 일치성이 검증되었다고 말할 수 있다. 그러나 δ 만큼 불일치가 존재한다고 가정하면, 다음과 같이 물리 상수에 ϵ 만큼 오차가

REFERENCES

- [16] K. Likharev and A. Zorin, Journal of Low Temperature Physics **59**, 347 (1985).
- [17] P. J. Mohr, B. N. Taylor and D. B. Newell, Journal of Physical and Chemical Reference Data **84**, 1527 (2012).

있다고 판단할 수 있다. 즉, $Q_S = e(1 + \varepsilon_S)$, $R_K = h/e^2(1 + \varepsilon_K)$, $K_J = 2e/h(1 + \varepsilon_J)$. 여기서 ε_S , ε_K , ε_J 는 불일치 파라미터이다. 이 관계식들을 위의 식 $K_J R_K Q_S - 2 = \delta$ 에 대입하여, ε 파라미터에 대해서 1차 항만 유지하면, $\varepsilon_S + \varepsilon_K + \varepsilon_J = \delta$ 가 된다. 그러면 (2)식의 실험 측정 결과는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$\varepsilon_S + \varepsilon_K + \varepsilon_J = \delta_{\text{exp}} \pm u_{\text{exp}} \quad (3)$$

여기서 δ_{exp} 는 영점검출기에서 측정되는 불일치 측정값이고 u_{exp} 는 측정 불확도가 된다. 따라서 δ_{exp} 값이 u_{exp} 보다 작다면 QMT는 측정 불확도 u_{exp} 내에서 일치한다고 결론 내릴 수 있다. 반대의 경우는 불일치 결론이 나오게 되는데, 이때는 불일치 원인에 대한 새로운 추가 연구가 필요하다. 참고로, 현재까지는 QMT 검증 실험이 성공하지 못하였는데, 가장 큰 이유는 양자 전류원의 출력이 현재의 측정기술과 비교해서 $10 \sim 100$ 배 정도 작기 때문이었다.

양자전류원의 안정성 및 보편성

향후 단전자 펌프가 양자 전류표준기로 공인받기 위해서는 소자 작동의 안정성 및 보편성 또한 담보되어야 한다. 안정성과 관련해서는, 단전자 펌프의 작동 조건이 실험 환경 변수에 얼마나 의존하는가에 대한 정량적인 분석 결과가 필요하다. 예컨대, 게이트 전압, 자기장, 온도 및 주파수 의존도 등에 대한 양자 전류원의 성능 변화에 대한 측정 평가가 요구된다. 즉, 단전자 펌프가 양자 전류표준기로 채택되기 위해서는 전류 고원의 평평도가 외부 변수의 영향으로부터 자유로워야 한다. 따라서 최적의 펌핑 조건에서 전류 고원의 외부 영향 평가를 수행하였다. 예컨대, 게이트 전압의 변화폭이 $50 - 100$ mV 크기일 때, 그리고 자기장 1 T 정도의 변화폭, 또한 온도 변화 0.3 K - 1.3 K 이내에서는 측정 불확도 크기가 유지되었다. 즉 KRISS 단전자 펌프 소자는 최적의 작동 조건에서 $0.87 \times$

10^{-6} 불확도가 유의미한 외부환경(전압, 자기장, 온도)의 변화에도 유지되었다.^[18,19] 이와 같은 소자의 안정성은 향후 양자 전류표준기로 채택되기 위해서 매우 중요한 특성이다.

앞에서 언급한 정밀측정 결과는 단전자 펌프 소자가 소자의 구조 및 기판의 종류에 관계없이 보편적인 결과라는 것을 보여준다고 믿고 있다. 왜냐하면, NPL 정밀측정 시스템에서 KRISS 소자와 NPL 소자가 거의 유사한 정밀측정 결과를 보여줬기 때문이다. 앞에서 언급하였지만, NPL 소자의 구조(그림 1)는 KRISS 소자와 다르고, 제작 방식도 다르다. 보편성 검증을 보다 확대 심화하기 위해서 국제 표준기관 상호간에 단전자 펌프 소자를 상호 교환하여 교차적으로 소자의 정확도 측정이 필요하고 이를 계획하고 있다.

맺는 말

SI 기본단위 중 하나인 전류단위 암페어의 재정의에 대해서 그 의의 및 실현 방법에 대해서 고찰하였다. 또한 재정의될 암페어의 실현 방안으로 유력한 단전자 펌프의 원리, 개발 현황 및 문제점 등을 KRISS 연구결과를 기초해서 기술하였다. 현재 소자 제작 기술과 정밀 측정 기술이 진보하고 있고, 또한 세계 각국의 표준관련 유관 연구 기관들이 협력 연구를 강화하고 있기 때문에 재정의를 실현할 수 있는 저출력의 양자 전류원은 개발이 될 것이라고 낙관적으로 전망된다.

REFERENCES

- [18] S. Giblin, M. Bae, N. Kim, Y.-H. Ahn and M. Kataoka, *Metrologia* **54**, 299 (2017); Y.-H. Ahn, M. Seo, S. Giblin, M. Kataoka, Y. Chung, N. Kim and M.-H. Bae, in *Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016)*, 2016 Conference on (IEEE, 2016).
- [19] The reason for the reduction of the uncertainty level here from the 2 ppm of the previous measurements is simply owing to the improvement in the system measurement uncertainty. Specifically, the uncertainty in the calibration of the reference resistance of 1 G Ω has been improved.