

# Cryogenic voltage sampling for arbitrary RF signals transmitted through a 2DEG channel

Min-Sik Kim<sup>a,b</sup>, Bum-kyu Kim<sup>b</sup>, U.J. Kim<sup>a</sup>, H.-K. Choi<sup>a</sup>, Ju-Jin Kim<sup>a</sup>, and Myung-Ho Bae<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Physics, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea

<sup>b</sup>Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 34113, Republic of Korea

(Received 22 February 2022; revised or reviewed 6 April 2022; accepted 7 April 2022)

## Abstract

A lossless transport of an arbitrary waveform in a frequency range of  $10^6$ – $10^9$  Hz through a conduction channel in a cryogenic temperature is of importance for a high-speed operation of quantum device. However, it is hard to use a commercial oscilloscope to directly detect the waveform travelling in a device located in a cryogenic system. Here, we developed a cryogenic voltage sampling technique by using a Schottky barrier gate prepared on a surface of a GaAs/AlGaAs device, which revealed that an incident rectangle waveform can transport through a 1 mm long two-dimensional conduction channel without waveform deformation up to 20 MHz, while further study is needed to increase the detection frequency.

**Keywords:** cryogenic voltage sampling, GaAs/AlGaAs, 2DEG, Schottky-barrier gate

## 1. 서 론

최근 활발히 연구되고 있는 고체 큐비트 (solid-state qubit) 등과 같이 양자 시스템에 적용하기 위한 양자 기술들은 일반적으로  $10^6$ – $10^9$  Hz 영역의 고속 작동을 필요로 하는 가운데 [1, 2], 상온 RF 장비와 저온 양자 소자 사이에 높은 대역폭을 가진 신호들을 원활히 교환시키는 기술은 중요한 요소 기술로 여겨지고 있다 [3]. 극저온 소자의 전도 채널에 임의의 RF 신호를 인가하여 채널 특정 위치에 입력한 신호를 변형없이 정확히 전달시켜 필요로 하는 작업을 수행해야 하는 경우, 전도 채널을 따라 전송되는 파형이 잘 전달되는지 확인이 필요하다. 본 연구에서는 GaAs/AlGaAs 이종접합(heterostructure) 을 기반으로 한 이차원 전자 가스 (two-dimensional electron gas, 2DEG)의 채널을 통해 전송되는  $10^6$  Hz 영역대의 주파수를 갖는 신호 파형이 1 mm 이내에서 변형되는지를 알아보기 위해, 채널 표면에 부착된 쇼트키 장벽 (Schottky barrier) 게이트 전극을 기반으로 하여 극저온에서 전압 샘플링 (Cryogenic Voltage Sampling, CVS)하는 방법을 구상하고 이를 실험을 통해 검증해 보았다. 샘플러 (Sampler)라 명명한 쇼트키 게이트를 통하여 적절한 형태의 펄스 전압을 가해주면, 입력 신호 파형 중에 펄스 시간 영역에 대응되는 일부분만이 소자의 채널을 통해 전송될 수 있게 되며, 이때 전송된 파형은 전류로서 측정이 된다. 측정된 전류 값은 결과적으로 옴릭 (Ohmic) 전극을 통해 인가된 후 쇼트키 전극이 위치한 곳까지 전송되었을 때의 파형에 해당된다. 이를 통해  $10^6$  Hz 영역 대의 신호가 1 mm 길이의 2DEG 채널을 이동하면서 초기의 파형을 유지함을 확인할 수 있었다.

## 2. 실험 방법

전자빔 리소그래피, 전자빔 증착, 식각 그리고 열처리 등의 반도체 나노 공정을 통해, 2DEG의 전하 밀도와 전기적 이동도가 각각  $2.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 와  $3.2 \times 10^6 \text{ cmV}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 인 GaAs/AlGaAs 웨이퍼로 전자 소자를 Fig. 1과 같이 제작하였다 [4–6]. 웨이퍼의 표면으로부터 66 nm 아래에 위치한 2DEG층과의 오믹 접합을 위해, 소스(source, S)와 드레인 (drain, D) 전극으로 Ni/Au/Ge/Ni/Au (3/200/100/75/50 nm)을 증착하였으며 [7, 8], 급속 열처리(Rapid thermal annealing)를 통해, 2DEG층으로 급속 합금을 침투시켜 오믹 접합을 형성하였다 (Fig. 1(a)). Fig. 1(b)와 같이, 여러 전극들 중에서 소자를 구동시키기 위해 사용한 전극들로는 S와 D로 표기한 오믹 전극과 SPL (샘플러), G1, G2로 표기한 게이트 전극이 있다. Fig. 1(b)의 내부 그림은 Fig. 1(b)에서 점선 네모의 샘플러 부분을 확대한 이미지로 3개의 게이트 전극들이 표기되어 있다. 샘플러의 작동은 캐패시터와 인덕터로 구성된 바이어스 티 (bias tee)를 통해 샘플러 게이트에 dc 전압과 펄스 전압을 동시에 인가하여, 채널 전도율을 시간에 따라 제어하는 방식으로 이루어진다. 한편, 소스 전극 으로서도 dc+ac 전압을 인가하게 되는데, 이 경우 임의의 파형이 길이 1 mm의 2DEG 전도 채널을 통해 흐르는 도중 (노란색 실선), 샘플러의 펄스 신호에 의해 선별된 신호만이 드레인으로 흘러가게 되어 전류 ( $I_D$ )로 읽히게 된다 (노란색 점선 화살표). 소자는 4.2 K의 액체 헬륨 환경을 유지하는 액체 헬륨 듀어(Dewar)에서 측정 하였으며, 샘플러와 소스에 인가되는 ac 전압은 임의 신호 파형기(AWG7122C, Tektronix)를 통해 생성하였다. CVS 작동을 위해, 실험 전반적으로 G1과 G2 게이트에는 각각  $V_{G1} = -0.08 \text{ V}$ ,  $V_{G2} = -0.02 \text{ V}$ 가 가해졌다.

\* Corresponding author: mhbae@kriss.re.kr

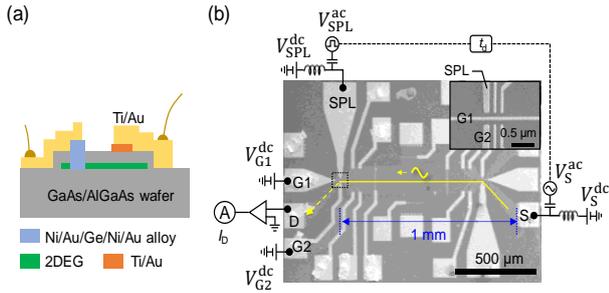


Fig. 1. (a) Schematic of GaAs/AlGaAs device. (b) Scanning electron microscope image of GaAs/AlGaAs device with an experimental configuration.

### 3. 결과 및 논의

Fig. 2(a)는 CVS 방법을 구현하기 위한 소자의 개략도다. 앞에서 설명한 바와 같이, 소스와 드레인은 2DEG 채널과 오믹 접합이 되어 있으며 샘플러는 쇼트키 장벽이 형성되도록 만들어진다. 소스 전극을 통해 임의의 테스트 신호를 가해주는 상황에서 샘플러에 충분한 크기의 음의 전압이 가해지면 샘플러 게이트 아래 부분의 전도 채널이 닫히게 되어, 채널을 따라 흐르던 전류 신호는 드레인으로 전송될 수 없게 되며, 충분히 큰 양의 전압이 가해지면 전송될 수 있게 된다. 이러한 게이트 스위치 특성을 활용하면, 채널이 닫힌 초기 조건에서, 샘플러에 적절한 펄스 형태의 전압을 가하여 펄스가 샘플러에 가해지는 시간에만 테스트 전압 신호에 비례하는 전류 (테스트 전류 파형)의 일부분을 통과시킬 수 있으며, 그 외의 시간 영역대에서는 전송되지 못하도록 할 수 있다. 즉, Fig. 2(b)와 같이 테스트 신호 파형에 비해 충분히 작은 폭을 지닌 펄스 전압을 샘플러에 가하면, 테스트 전류 파형에서 해당 영역의 전류만이 드레인으로 전송되는 것이다. 이를 통해 주기를 갖는 테스트 신호에서 특정 시간의 파형만 샘플링 할 수 있게 된다 [Fig. 2(b)i]. 또한 테스트 신호에 대한 펄스 전압의 위상차( $\Delta\phi$ )를 변화시키는 방법을 통해 두 신호 간에 지연 시간( $t_d$ )을 설정할 수 있는데, 이를 활용하면 Fig. 2(b)ii와 같이 다른 시간 영역의 테스트 신호를 샘플링 할 수 있게 된다. 그리하여 최종적으로 Fig. 2(c)와 같이, 파형 주기 안에서  $t_d$ 의 함수로  $I_D$ 를 측정하면, 테스트 신호의 파형을 얻을 수 있게 된다.

Fig. 3(a)는 소자의  $I_D$ - $V_{SPL}$  곡선으로 샘플러 전극을 통해 채널을 열고 닫을 수 있는 전압을 설정하기 위해 측정하였다. 소스를 통해 전송될 파형이 전류로 측정되므로 채널 특성으로 인해 파형에 변형이 생기지 않도록 최대한 옴의 법칙을 따르는 영역에서 신호를 생성해야 정확한 파형을 얻을 수 있다. Fig. 3(b), (c)는 각각 CVS를 작동하기 위해 설정한  $V_S(t)$ 와  $V_{SPL}(t)$  파형으로, 바이어스티를 지나 최종적으로 전극에 가해질 주파수 1 MHz의 파형들이다.  $V_S(t)$ 는 AWG를 통해 한 주기인  $1 \mu\text{s}$  중에서  $0.3 \mu\text{s}$  동안 0.1 V의 전압이 생성되도록 하였으며 추가로 0.1 V dc 오프셋 전압을 가했을 때의 결과이다.  $V_{SPL}(t)$ 는 AWG의 다른 출력을 통해  $1 \mu\text{s}$  주기 중에서 10~100 ns의 상대적으로 짧은 시간 동안만 0.2 V의 전압이 생성되도록 하였으며, 추가적으로  $-0.2 \text{ V}$  dc 오프셋 전압을 가했을 때의 결과이다.

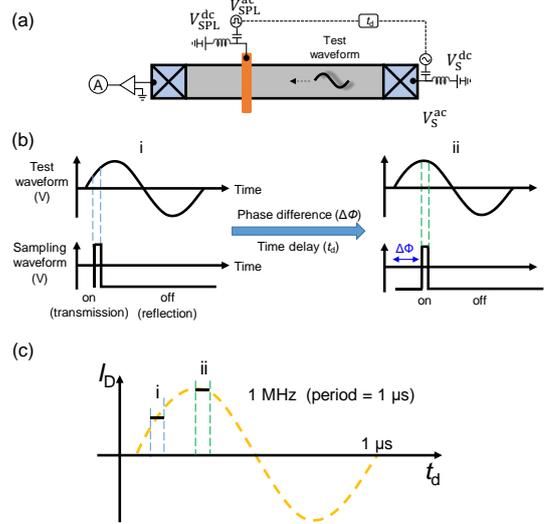


Fig. 2. (a) Schematic of the CVS method. Device is composed by three electrodes; source (S), drain (D) and sampler (SPL), where S and D are Ohmic contacts and SPL is a Schottky contact. (b),(c) Principle of the CVS method (see the main text for the details).

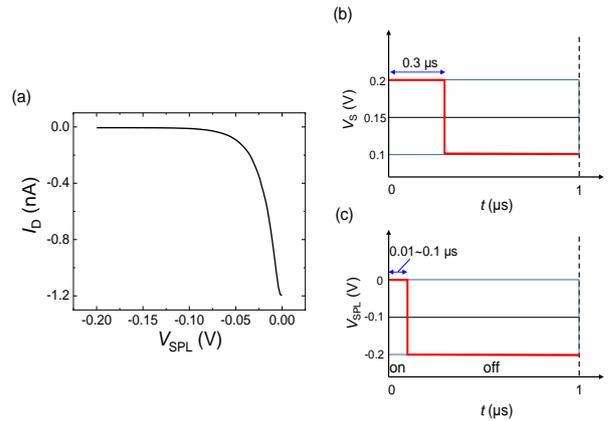


Fig. 3. (a)  $I_D$ - $V_{SPL}$  characteristic of 2DEG channel of 1(b). (b),(c) Output waveforms generated from two-output AWG imposed by dc voltage for  $V_S$  and  $V_{SPL}$ , respectively.

위와 같이 테스트 파형과 샘플러 파형 전압을 설정하고, 소스를 통해 인가된 전압 파형에 의해 형성된 전류 파형이 전도 채널을 따라 전송되어 1 mm 떨어져 위치한 샘플러 게이트에 도달했을 때, 도착한 전류 파형에 대해 조사하였다. 이를 위해, 변조 펄스 폭에 따라 어떠한 차이가 있는지 먼저 알아보기 위한 측정을 다음과 같이 수행하였다. Fig. 4(a)는 Fig. 3(b)의 주파수가 1 MHz인 사각파를 소스 전극에 인가 한 후, 샘플러에 가하는 펄스폭을 100, 25, 10 ns로 바꿔가면서 측정한 결과를 보여 준다. 여기서, 사각파의 주기에 대해 펄스 폭의 비율은 순서대로 10%, 2.5%, 1%에 대응된다. 10%의 펄스폭으로 측정한 결과를 보면 가해진 파형이 대략 400 ns의 사각폭을 갖는 것으로 샘플링 되었는데, 이는 실제 파형의 사각폭인 300 ns 대비 약 30%의 오차를 의미한다. 한편, 펄스폭 비율이 2.5%의 경우에는 약 330 ns, 1%는 320 ns 수준으로 사각폭을 샘플링 하였고, 이는 펄스 폭이 작을 수록 검출된 전류 파형이 실제 파형과 가까워진다는 것을 의미한다. 또한

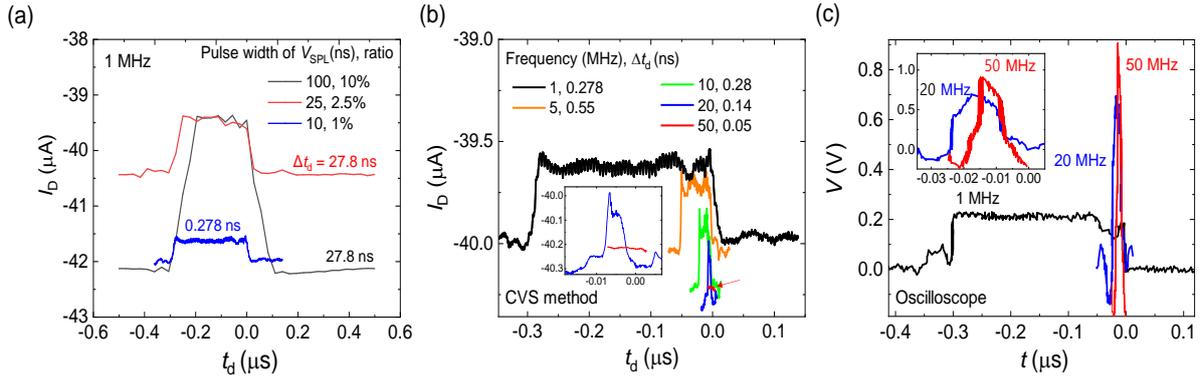


Fig. 4. (a) Pulse-width dependence of CVS measurement, where  $\Delta t_d$  is the delay time resolution. (b) Frequency dependence of CVS measurement, where 50 MHz response is indicated by the red arrow. Each curve was vertically shifted for the clarity. Original base current levels were  $\sim 40.0, 33.0, 29.6, 15.3$  and  $0.2 \mu\text{A}$  with a frequency ascending sequence. The inset: Zoom-in plots of data for 20 and 50 MHz of (b). (c) 1 MHz waveform measured by an oscilloscope. The inset: Zoom-in plots of data for 20 and 50 MHz of (c).

소스에 가해진 파형의 원형과 측정결과가 거의 일치하므로, 1 MHz의 사각 전압 파형이 1 mm 길이의 채널을 이동하면서 파형에 변형이 거의 없었음을 알려준다. Fig. 4(b)의 검은색 커브는 (a)의 1% 펄스폭 비율로 측정된 전류 파형을 확대해 다시 그린 것이다. Fig. 4(b)는 1, 5, 10, 20 그리고 50 MHz 순으로 주파수를 높여가며 샘플링을 한 결과를 보여 주고 있는데, 모든 테스트 사각 파형의 폭은 한 주기 대비 30%의 폭으로 설정하였으며, 주파수 순서대로 300, 60, 30, 15 그리고 6 ns가 30% 사각 파형의 시간폭이 된다. 샘플러의 펄스폭은 5개의 경우 모두 각 주파수에 해당하는 주기의 1%로 고정하였다. 측정 결과, 20 MHz까지는 순차적으로 각 사각파의 폭을 330, 55, 25, 15 ns의 수준으로 상당히 정확하게 샘플링 하였으나, 빨간 화살표로 표기한 바와 같이, 50 MHz에선 유의미한 샘플링 결과가 나오지 못하였다(Fig. 4(b) 내부 그림 참조). 또한 Fig. 4(b) 내부 그림과 같이, 샘플링된 20 MHz 사각 파형의 형태가 불균일해 보인다. 그에 대한 원인을 파악하고자 1 GHz 대역 오실로스코프로 어태뉴에이터(attenuator)와 바이어스티에 입력되기 전의 신호를 측정된 파형과 비교를 해보았다(Fig. 4(c)와 내부그림). 비교 결과, CVS 방법으로 샘플링한 20 MHz에서의 파형은 Fig. 4(b) 내부 그림에서 보인 전류 픽(peak)을 제외하면 오실로스코프로 측정된 결과와 유사한 파형을 보이고 있어, CVS 방법이 20 MHz 측정에서 유효했음을 알 수 있었다. 반면, 50 MHz의 경우는 오실로스코프 에서만 파형을 읽을 수 있었었는데, 그 이유로 CVS 방법이 50 MHz의 파형을 샘플링 하지 못한 건지, 아니면 실제로 파형이 변형된 결과인지는 추가적인 확인과정이 필요한 상황이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 상온의 환경에서 가해주는 신호가 4 K 이하의 저온에 있는 소자의 채널을 지나며 입력 신호의 변형없이 온전히 전송되고 있는지를 확인하기 위해, 소자 채널 위에 위치한 샘플러 쇼트키 게이트를 이용하여 샘플링하는 저온 전압 샘플링 (CVS) 방법을 구상하고

확인하는 실험을 수행하였다. 실험결과 펄스의 폭이 가해진 신호의 주기에 대해 충분히 작다면 주파수 20 MHz 정도까지 가해진 신호에 근접한 파형을 얻을 수 있다는 결론을 얻었다. 또한 소자의 상황에 따라 다르지만 1 mm의 채널을 이동하는 동안 20 MHz 이내의 신호에 별다른 변형이 생기지 않았음을 알 수 있었다. 한편, 50 MHz 신호에 대해선 샘플링 결과 사각파를 관측하지 못하였다. 그 이유로 CVS 방법이 50 MHz의 파형을 샘플링 하지 못한 건지, 아니면 실제로 파형이 변형된 결과인지는 추가적인 확인 과정이 필요한 상황이다. 또한  $I_b$ 에 따른  $I_b$  특성을 상세하게 알고있다면 측정된 전류 값을 전압으로 환산하여 실제 파형의 모양뿐만 아니라 전압까지도 샘플링 할 수 있을 것으로 보인다. 전압 변조 등이 필요한 극저온 양자 소자 실험에서 파형이 채널 내에서 변한다면 어디에서 변하는 지를 확인하는 것이 중요한데, 본 연구에서는 쇼트키 게이트가 위치해 있는 채널 내의 원하는 곳에서 샘플링을 할 수 있음을 보여주었다.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS-2021- GP2021-0001) and the National Research Foundation of Korea (NRF) (Grant Nos. 2020R1F1A1075216, 2021R1A2C3012612, 2022M3E4A1077102 and SRC2016R1A5A1008184).

#### REFERENCES

- [1] Y. -H. Ahn, C. Hong, Y. -S. Ghee, Y. Chung, Y. -P. Hong, M. -H. Bae, and N. Kim, "Upper frequency limit depending on potential shape in a QD-based single electron pump," *Journal of Applied Physics*, vol. 122, pp. 194502, 2017.
- [2] G. Yamahata, S. P. Giblin, M. Kataoka, T. Karasawa, and A. Fujiwara, "Gigahertz single-electron pumping in silicon with an accuracy better than 9.2 parts in  $10^7$ ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 109, pp. 013101, 2016.
- [3] N. Johnson, J. D. Fletcher, D. A. Humphreys, P. See1, J. P. Griffiths, G. A. C. Jones, I. Farrer, D. A. Ritchie, M. Pepper, T. J. B. M. Janssen1, and M. Kataoka, "Ultrafast voltage sampling using single-electron wavepackets," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 110, pp. 102105, 2017.

- [4] A. Y. Cho, "Morphology of Epitaxial Growth of GaAs by a Molecular Beam Method: The Observation of Surface Structures," *Journal of Applied Physics*, vol. 41, pp. 2780, 1970.
- [5] V. Umansky and M. Heiblum, "Molecular Beam Epitaxy: From research to mass production, Chapter 6 MBE growth of high-mobility 2DEG," *Elsevier Inc.*, pp. 121-137, 2012.
- [6] M. Seo, Y. -H. Ahn, Y. Oh, Y. Chung, S. Ryu, H. -S. Sim, In-Ho Lee, M. -H. Bae, and N. Kim, "Improvement of electron pump accuracy by a potential-shape-tunable quantum dot pump," *Phys. Rev. B*, vol. 90, pp. 085307, 2014.
- [7] R. A. Bruce and G. R. Piercy, "An improved Au/Ge/Ni Ohmic contact to n-type GaAs," *Solid-State Electronics*, vol. 30, pp. 7, 1987.
- [8] G. S. Marlow, M. B. Das, and L. Tongson, "The characteristics of Au/Ge-based ohmic contacts to n-GaAs including the effects of aging," *Solid-State Electronics*, vol. 26, pp. 259, 1983.