

양자정보처리를 위한 이온트랩 내 이온 셔틀링 구현에 대한 연구

1)이민재, 1)정준호, 1)정창현, 1)박윤재, 2)김태현, 1)조동일*

1) 서울대학교 전기정보공학부, ASRI/ISRC (*dicho@snu.ac.kr)

2) 서울대학교 컴퓨터공학부, ASRI/ICT

A Study on Ion Shuttling Process in Ion Traps for Quantum Information Processing

1)Minjae Lee, 1)Junho Cheong, 1)Changhyun Jung, 1)Yunjae Park, 2)Taehyun Kim, 1)Dong-il Cho*

1) Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, ASRI/ISRC (*dicho@snu.ac.kr)

2) Department of Computer Science and Engineering, Seoul National University, ASRI/ICT

요약

본 논문은 이온트랩기반의 대규모 양자 정보 처리시스템 구현을 위한 이온 셔틀링 기술의 실험결과를 제시한다. 위 실험을 위하여 최대 32개의 DC 전극 전압을 조절할 수 있는 32채널 디지털-아날로그 변환기 (DAC) 시스템을 자체 개발하였다. 이온의 포획 위치를 일정 간격으로 조절 가능한 전압 세트를 시뮬레이션으로 도출하였고, 생성된 전압 세트는 DAC를 통해 이온트랩 내 전극들에 가해지는 DC 전압을 동시에 변화시켜 이온을 안정적으로 셔틀링시킨다. 자체 제작한 전압 세트 및 32채널 DAC를 통해 실제 포획된 이온으로 셔틀링 실험을 진행하여 이온의 장거리 이동이 가능함을 확인하였으며, 향후 대규모 양자정보처리 시스템 구현에 활용될 것으로 기대된다.

I. 서론

이온트랩은 대규모 양자정보처리 시스템 구현의 유력한 플랫폼 중 하나로서, 포획된 이온의 양자화된 내부 에너지를 이용하여 양자정보를 저장하는 것이 가능하다. 평면 이온트랩은 높은 양산성 및 집적성을 가져, 향후 대규모 집적 이온트랩을 이용한 양자 정보 기술 상용화에 활용될 것으로 기대되고 있다[1]. 대규모 집적 이온트랩 시스템을 실현하기 위해서는 이온트랩 내에 포획된 이온을 원하는 위치로 이동시킬 수 있는 셔틀링 기술의 확보가 필수적이다[2]. 본 논문에서는 선형 평면 이온 트랩에 포획된 이온을 이동시키기 위해[3], [4] 이온의 이동 경로를 따라 배치된 최대 32개의 DC 전극들에 가해지는 전압을 변경하여 원하는 위치에 특정 형상의 전기 포텐셜을 임의로 생성하는 기술을 개발하고, 8개의 DAC 칩을 FPGA를 통해 제어하여 PC에 저장된 셔틀링 용 전압 세트에 맞춰 DC 전극들에 인가되는 전압을 동시에 조절할 수 있도록 하였다.

II. 본론

본 연구에는 자체적으로 설계 및 제작한 microelectromechanical systems(MEMS) 기반 평면 이온트랩 및 초고진공(UHV) 챔버가 이용되었다[5]. 해당 이온트랩칩은 약 1×10^{-11} Torr의 초고진공 환경에서 전극 중 14개를 활용하여 이터븀(Yb) 이온을 포획한 뒤, 30개의 전극의 전압을 동시에 변경하는 것으로 포획된 이온을 이동시키는 셔틀링 기술을 구현하였다. 본 실험에서는 이온을 포획할 시 사용하는 potential well의 형상을 이온의 이동 경로에 따라 $2\mu\text{m}$ 간격으로 총 400개의 위치에서 구현할 수 있도록 하고, 이를 따라 이온의 포획 위치를 점진적 이동시키고자 했다. 이를 위해 COMSOL을 이용한 각 전극의 전기 포텐셜 시뮬레이션 결과를

MATLAB으로 분석하여 임의의 위치에서 목표 포텐셜 우물 형상을 생성할 수 있는 전압 세트를 계산하고, 이를 순서대로 전극에 입력하도록 하였다. 전압 세트 입력이 가능한 DAC 시스템 구현을 위해 각각 4개의 출력을 지닌 DAC8734(Texas Instruments) 칩 8개를 활용하여 32개의 DC 전압 출력을 확보하였으며, DAC8734 칩들은 USB로 PC와 연결된 Arty-7(Xilinx) FPGA 보드를 통해 각 전극이 출력해야 하는 전압을 입력받아 최대 32개 출력을 동시에 변경하게 된다. DAC와 이온트랩 내부 전극을 잇는 DC 회로는, 이온 포획 시 사용되는 RF 전기장으로 인한 커플링 현상을 막기 위해 2개의 LC필터를 거쳐 연결된다. 위에서 개발한 DAC 시스템을 통해 0.5초마다 전압 세트를 변경하여 초당 약 $4\mu\text{m}$ 속도로 이온을 $200\mu\text{m}$ 왕복시키는 실험에 성공하였다.

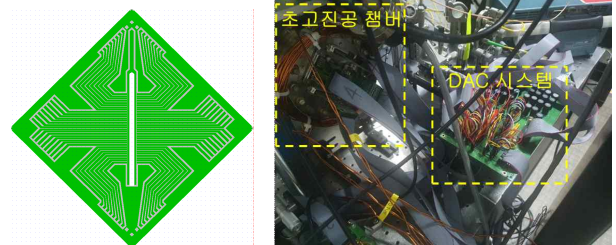


Fig. 1 실험에 사용된 이온트랩 칩 구조 및 DAC 시스템

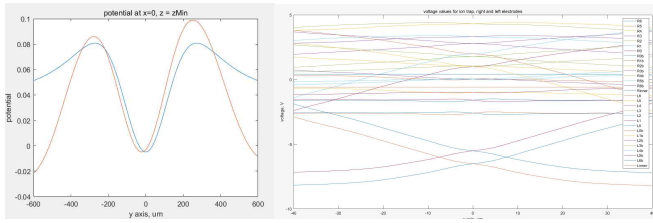


Fig. 2 이온 20 μm 이동 시 포텐셜 구조 변화 및 1개 전극 거리(78 μm) 이동 도중 각 전극들의 입력 전압 변화

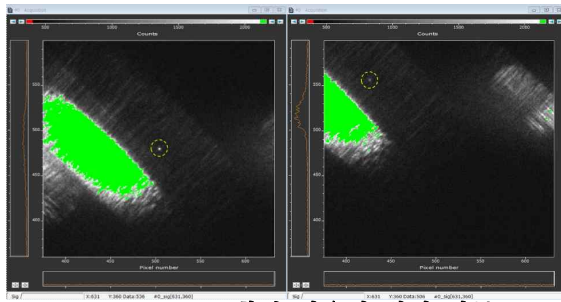


Fig. 3 포획된 이온의 위치 이동

III. 결론

본 논문에서는 이온을 포획 가능한 포텐셜 우물의 형상을 이동시키는 것으로 이온을 서틀링 시키는 실험결과를 보였다. 본 실험을 위하여 이온의 포획 위치를 2 μm 간격으로 조절 가능한 전압 세트를 계산하여 PC에 저장하였으며, 이를 FPGA를 통해 DAC에 입력하는 것으로 최대 32개의 이온 트랩 내의 DC 전극의 전압을 동시에 변경 가능한 시스템을 구축하였다. 또한, 계산된 DC 전압 세트와 제작된 DAC 시스템을 활용하여 실제 이온의 장거리 서틀링 실험을 진행하여 이온이 안정적으로 장거리 이동 가능함을 보였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2020-2015-0-00385)

참 고 문 헌

- [1] D. Cho, et al., "A review of silicon microfabricated ion traps for quantum information processing," Micro and Nano Systems Letters, vol. 3, no. 2, 2015.
- [2] C. Monroe, & J. Kim, "Scaling the ion trap quantum processor," Science, vol. 339, no. 6124, pp. 1164-1169, 2013.
- [3] G. Huber, et al., "Transport of ions in a segmented linear Paul trap in printed-circuit-board technology," New Journal of Physics, vol. 10, pp. 013004, Jan. 2007.
- [4] Y. Park, et al., "Design Method of DC Voltages for Position Control of Trapped Ions," The 31th ICROS Annual Conference, pp. 10-11, Seoul, Mar. 10-11, 2016.
- [5] S. Hong, et al., "Experimental Methods for Trapping Ions Using Microfabricated Surface Ion Traps," Journal of visualized experiments, vol. 126, pp. 56060. Aug. 2017.