

과제계획요청서

PROJECT PROPOSAL REQUEST (PPR)

양자통신용 단일 광자를 상온에서 발생할 수 있는 기술
(SPEAR: Single Photon Emission Advanced Research)

PPR No. ASTRA01_2401PPR1

과제계획요청서(PPR) 공고일: 2024. 4. 4.

연구개발계획서 접수 마감일: 2024. 5. 9.

공모유형: 분야공모

보안과제여부: 일반



과학기술정보통신부



한국연구재단

한계도전전략센터

Advanced Science & Technology Research Agency (ASTRA)

1. 과제 개요

한국연구재단 한계도전 전략센터에서는 광자 기반 양자 기술의 글로벌 선단 기술을 확보하기 위해, 단일 광자 발생 기술의 상온 동작과 고성능화 이슈를 해결할 수 있는 혁신기술 개발 프로젝트(SPEAR¹⁾)를 추진합니다.

양자통신의 안정성과 보안성을 절대 보장하려면 확정적 단일 광자 생성이 필수적입니다. 단일 광자 발생기(SPE)는 특정 양자 암호 키를 생성하고 안전하게 전송하여 양자 네트워크 연결을 가능하게 합니다. 그러나 현재까지 개발된 SPE는 효율성과 안정성이 낮아 극저온에서 동작시켜야 하고, 광통신 파장 대역의 광자 생성에 한계가 있었습니다.

본 SPEAR 프로젝트의 주요 목표는 기존 SPE의 한계를 극복하기 위한 새로운 아키텍처를 제안하고, 확정적 단일 광자 발생 성능을 증명하는 프로토타입을 제작하는 데 있습니다. 소재 단위의 양자 현상 탐구를 넘어서 실용적 가치를 지닌 SPE 소자 프로토타입 실증을 통해 양자통신 분야의 혁신적 발전을 도모하고자 합니다.

2. 추진 배경

기술 패권 시대가 본격화되면서 양자기술은 미래 정보통신 산업과 안보 측면에서 국가적 차원의 전략기술로 부상하고 있습니다. 양자통신 기술은 정보 탈취를 원천 차단할 수 있는 보안기술로, 국방, 금융, 의료 분야와 같이 절대적인 보안이 필요한 분야에서 먼저 활용될 것으로 예상되며, 미래의 양자 인터넷 통신을 위한 필수적인 기술입니다. 양자통신 분야에서 세계적으로 앞서 있는 중국은 수백 km이상의 장거리 양자통신 기술을 구현했으며,²⁾ 미국 DARPA에서는 전통적인 통신 인프라에 양자 네트워크의 효율적 보안 기능을 통합하는 프로그램을 최근 공개한 바 있습니다.³⁾ 국내에서도 유선 양자키분배(quantum key distribution) 시스템을 마련하고 장거리 양자통신을 위한 기술 개발 투자가 진행 중이나, 핵심 원천기술에 대한 연구개발은 미비한 실정입니다.

1) SPEAR: Single Photon Emission Advanced Research

2) Wang, S., Yin, ZQ., He, DY. et al. Twin-field quantum key distribution over 830-km fibre. Nat. Photon. 16, 154-161 (2022).

3) Quantum-Augmented Network (QuANET) program. <https://www.darpa.mil/news-events/2023-06-13>

단일 광자 발생기(SPE)는 양자통신 분야에서 안전한 정보 전송과 양자 네트워크의 구축에 필수적인 핵심 기술입니다. 현재 주로 사용되는 양자통신용 광자 발생 기술은 레이저 빛을 감쇄시켜 확률적으로 유사 단일 광자를 얻어내 활용하는 방법과 나노미터 크기의 반도체 양자점을 이용하여 극저온 환경에서 단일 광자를 생성하는 방법이 있습니다. 그러나 레이저 감쇄를 통한 방법은 효율성이 낮고 불확실성으로 인해 완벽한 양자 기술 구현에 제약이 있습니다. 일반적으로 양자 기술은 열 변동에 의한 노이즈를 최소화하고 양자상태의 결맞음(coherence)을 확보하기 위해 극저온(액체 헬륨 온도, 4K 이하) 환경에서 구현됩니다. 이러한 온도를 유지하기 위한 냉각장치와 에너지 비용이 높아 양자통신 기술의 적용 확대와 기존 통신 기반 시설과의 연계에 있어 치명적인 문제점이 존재합니다.

상온에서 통신 파장대의 광자를 발생하는 연구에 있어 혁신적인 결과가 2018년에 보고된 바 있습니다.⁴⁾ GaN결정의 결함(defect)으로부터 발생하는 SPE는 당시 기록적으로 높은 밝기(10^6 counts/s), 우수한 순도($g^2(0) \sim 0.05$), 큰 분극성(emission polarization $\sim 93.2\%$)으로 인해, 즉시 유망한 후보 기술로 주목받았습니다. 특히 호스트 물질이 GaN이기 때문에 LED의 고체 조명 기술과 관련된 산업기술 기반을 활용할 수 있다는 장점이 있었습니다. 그러나 2018년 첫 번째 논문이 발표된 이후 여러 그룹에서 GaN를 이용한 SPE 연구를 지속했지만⁵⁾, 뚜렷한 기술적 진전은 보고되지 않고 있습니다.

질소(N) 이온을 다이아몬드 결정구조에 도입하면 탄소 공석(vacancy)이 발생하며, 질소와 공석의 결합으로 특수한 전자 상태와 스핀 상태를 지닌 N-V 센터(색 중심, color center)가 생성됩니다. N-V 센터는 높은 효율과 안정성을 갖는 단일 광자를 생성할 수 있어, 다양한 양자기술에 활용되고 있습니다.⁶⁾⁷⁾ N-V 센터 이외에도 Si, Ge 등 IV족 원소 결함을 지닌 다이아몬드를 이용하여 단일 광자 발생 연구가 진행되었습니다.⁸⁾ 소재 합성과 특성 평가 연구는 활발하지만, 여전히 다이아몬드 color center에 기반한 SPE 소

4) Yu Zhou et al., Room temperature solid-state quantum emitters in the telecom range, Sci. Adv. 4, eaar3580 (2018).

5) Meunier, Max, et al., Telecom single-photon emitters in GaN operating at room temperature: embedment into bullseye antennas, Nanophotonics 12, 1405 (2023).

6) Liu K, Zhang S, Ralchenko V, et al. Tailoring of typical color centers in diamond for photonics. Adv Mater. 33, 2000891 (2021).

7) Bradac, C., Gao, W., Forneris, J. et al. Quantum nanophotonics with group IV defects in diamond. Nat Commun 10, 5625 (2019).

8) Sarah Lindner et al, Strongly inhomogeneous distribution of spectral properties of silicon-vacancy color centers in nanodiamonds, New J. Phys. 20, 115002 (2018).

자는 충분히 만족스러운 성능을 보여주고 있지 못합니다.

III-V족 반도체 양자점 소재는 밝기 특성이 우수하여 SPE 개발에 응용하려는 연구가 꾸준히 이어지고 있습니다.⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾ 그 외에도 탄소나노튜브(CNT)¹²⁾, 전이금속 기반 2차원 소재¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾, 페로브스카이트 양자점¹⁶⁾¹⁷⁾ 등의 다양한 나노물질이 단일 광자 발생을 위해 연구되고 있습니다.

위에 언급한 다양한 단일 광자 발생 소재는 대부분 결정 내에 흩어져 있는 결함에 기인하기 때문에 SPE 발생 위치를 임의로 조절할 수 없어 광학소자 제작에 큰 어려움이 있습니다. 이러한 문제를 극복하는 방법으로 2차원 소재를 이용하여 원하는 위치에서 단일 광자 발생을 유도하는 연구가 보고되고 있습니다.¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾ 탐침을 이용한 나노 인텐테이션 기술이나 나노패턴을 이용하여 2차원 소재에 국부적인 구조 변형을 주면 에너지 밴드의 변화로 광자가 방출되는 원리입니다.

특정 위치에 SPE 소자를 제작하는 공간적 확정성뿐만 아니라, 원하는 시간에 원하는 주기로 단일 광자를 발생할 수 있는 시간적 확정성을 지닌 엄밀한 의미의 SPE 기술을 개발하기는 여전히 매우 어려운 과학 기술적 난제입니다.

지금까지 단일 광자 발생을 위한 다양한 소재와 메커니즘 연구가 있었지만,

-
- 9) Holewa, P., Burakowski, M., Musiał, A. et al. Thermal stability of emission from single InGaAs/GaAs quantum dots at the telecom O-band. *Sci Rep* 10, 21816 (2020).
 - 10) Musiał, A., Holewa, P., Wyborski, P., Syperek, M., Kors, A., Reithmaier, J.P., Sęk, G. and Benyoucef, M., High-Purity Triggered Single-Photon Emission from Symmetric Single InAs/InP Quantum Dots around the Telecom C-Band Window. *Adv. Quantum Technol.* 3, 1900082 (2020).
 - 11) Patrick Laferrière, Sofiane Haffouz, David B. Northeast, Philip J. Poole, Robin L. Williams, and Dan Dalacu, Position-Controlled Telecom Single Photon Emitters Operating at Elevated Temperatures, *Nano Letters* 23, 962 (2023).
 - 12) He, X. et al., Tunable room-temperature single-photon emission at telecom wavelengths from sp³ defects in carbon nanotubes. *Nat. Photon.* 11, 577 (2017).
 - 13) He, Y.-M. et al., Single Quantum Emitters in Monolayer Semiconductors. *Nat. Nanotechnol.* 10, 497 (2015).
 - 14) Gao, T., von Helversen, M., Antón-Solanas, C. et al. Atomically-thin single-photon sources for quantum communication. *npj 2D Mater Appl* 7, 4 (2023).
 - 15) Zhao, H., Pettes, M.T., Zheng, Y. et al. Site-controlled telecom-wavelength single-photon emitters in atomically-thin MoTe₂. *Nat Commun* 12, 6753 (2021).
 - 16) Hendrik Utzat et al., Coherent single-photon emission from colloidal lead halide perovskite quantum dots, *Science* 363,1068 (2019).
 - 17) C. Zhu, M. Marczak, L. Feld, et al., Room-temperature, highly pure single-photon sources from all-inorganic lead halide perovskite quantum dots, *Nano Lett.* 22, 3751 (2022).
 - 18) Palacios-Berraquero, C. et al., Large-Scale Quantum-Emitter Arrays in Atomically Thin Semiconductors. *Nat. Commun.* 8, 15903 (2017).
 - 19) Rosenberger, M. R. et al., Quantum Calligraphy: Writing Single-Photon Emitters in a Two-Dimensional Materials Platform. *ACS Nano* 13, 904 (2019).
 - 20) Utama, M.I.B., Zeng, H., Sadhukhan, T. et al. Chemomechanical modification of quantum emission in monolayer WSe₂. *Nat Commun* 14, 2193 (2023).

양자통신을 위한 현장 적용할 수 있는 확정적 SPE 기술은 아직 개발되지 못한 것으로 파악됩니다. 실용적 가치를 지닌 SPE를 개발하기 위해서는 그림1에서 제시하는 바와 같이, 크게 3가지의 기술 목표(상온 동작, 광통신대역 파장, 확정적 단일 광자)를 달성해야만 할 것으로 판단합니다.



그림 1. 이상적인 단일 광자 발생 기술의 요구 사항

상온 동작은 양자 시스템의 에너지 소비와 효율성 면에서 매우 중요합니다. 극저온 냉각이 필요 없는 단일 광자 발생 소자를 개발하면 양자통신 시스템의 소형화와 비용을 크게 절감하여 양자 기술의 적용 확대를 도모할 수 있을 것입니다. 광통신에서 사용되는 파장 대역($1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$)의 광자를 만드는 것은 기존 광통신 인프라와의 호환성을 위해 중요한 요구 사항입니다. 단일 광자의 고품질 양자 특성은 양자 정보 처리와 양자통신 응용에 있어서 기본적인 요소입니다. 양자 비결정성이나 양자 얽힘 등의 현상을 발현할 수 있는 순도와 밝기뿐만 아니라, 실제 SPE 소자 제작에 있어서 확장성(scalability)과 통합성(integration)을 고려한 기술 개발이 요구됩니다.

본 SPEAR 프로젝트에서는 이러한 목표를 달성하기 위해 재료 선택, 소자 설계, 광자 생성 메커니즘의 이해, 특성 평가 등에 관한 철저한 연구와 실험이 필요할 것입니다. 한계도전 사업에서는 소재 발굴과 양자 특성 확인만을 목적으로 하지 않습니다. 실험적 연구와 SPE 프로토타입 제작과 실증에 중점을 두어 양자통신 기술 분야에 혁신적인 발전을 선보이고자 합니다.

3. 과제 목표 및 범위

(최종 목표)

SPEAR 프로젝트의 목표는 상온에서 광통신파장 대역의 확정적 단일 광자를 생성하는 SPE 소자를 개발하는 것입니다.

과제 제안자는 상온 동작 SPE 물질의 실험적 검증과 SPE 소자의 프로토타입 제작을 통해, 아래의 조건을 만족하는 SPE 소자를 개발하는 도전적이고 독창적인 아이디어를 제시해야 합니다.

- 확정적(deterministic) 단일 광자 생성 기술일 것: 동일한 특성의 단일 광자를 반복 생성하고 생성 주기를 제어할 수 있을 것
- SPE 소자는 상온에서 작동하며 단광자의 파장대역은 1.2 ~ 1.6 μm 일 것
- 기존 SPE 기술과 차별화되고 소형화·집적화가 가능한 새로운 아키텍처를 제안할 것
- SPE 출력부(in optical fiber)에서 얻어지는 광원의 특성(밝기, on-demand 반복률, 단광자 순수도)에 목표치, 그 도전성에 대한 의미와 과학 기술적 근거를 제시할 것

상기 열거된 관련 지표는 전체 목록이 아닐 수 있습니다. 연구 제안자는 새롭게 조정하거나 향상할 수 있는 지표를 제안할 수 있으며, 이 경우 해당 지표가 양자통신용 광원의 성능과 관련된 의미를 설명해야 합니다.

(기술 영역)

본 SPEAR 프로젝트의 주요 연구개발 초점은 상온 작동 SPE 소자를 제작하여 유선 광통신대역의 확정적 단일 광자를 생성하는 것입니다. 이를 위해 새로운 양자소재를 합성하거나 기존 소재를 채택하여 새로운 단일 광자 발생소자를 디자인할 수 있습니다. 단순히 재료단위의 현상 탐구에 머무르지 않고 실제 SPE 소자를 제작함으로써 광자 기반 양자기술 영역의 진전을 이룰 수 있을 것입니다.

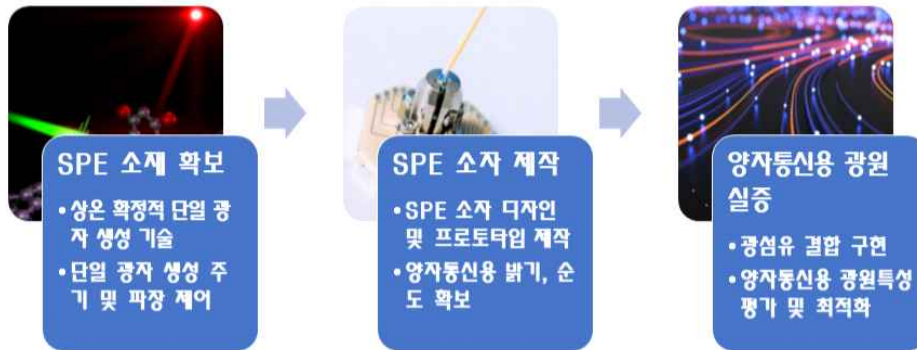


그림 2. SPEAR 프로젝트의 기술 개발 영역

과제 제안자는 이 프로젝트의 목표를 고려하여 제안하는 광자발생 소재와 SPE 소자 구조에 대한 자세한 설명을 제공해야 합니다. 이는 자신의 접근 방식의 타당성, 제안된 소재/소자가 SPEAR 프로젝트의 목표 및 지표를 충족시킬 수 있는 실험적 실행 가능성, 그리고 제안된 소재와 소자 구조가 어떻게 SPE 기술에 혁신을 가져올 것이라는 명확한 설명을 포함해야 합니다. 제안서는 최소한 다음 사항을 포함해야 합니다.

- 제안된 접근 방식에 대한 설명, 과제 수행 기간에 개발 및 시연될 내용에 대한 설명과 기술 개발 로드맵, 성과 이정표(milestone)를 함께 제공해야 합니다.

- 제안자는 해당 분야에서 현재까지 연구되어 온 소재와 소자에 대한 최첨단 기술과의 비교를 포함해야 합니다. 이는 제안자의 접근 방식이 왜 혁신적이고 차별화된 것인지는 설명하는 것입니다. 이론적 분석을 기반으로 제안된 소재와 SPE 소자의 모델, 시뮬레이션, 또는 개념 증명 데이터를 포함할 수 있습니다. 이 분석은 제안된 양자재료가 어떻게 SPE 소자와 관련된 특성을 조정, 수정 또는 향상시킬 수 있는지에 대한 논의를 포함해야 합니다.

- 제안된 SPE 소자 개발에 사용될 재료의 공급 혹은 합성 방법, SPE 소자 제작 및 평가 방안에 대한 설명을 포함합니다.

- 제안된 SPE 기술이 양자기술 관련 분야에 왜 변화를 불러올 수 있는지에 대한 논의와 잠재적 이점을 포함한 기술적 파급효과를 간략히 설명합니다.

(제외 대상)

본 프로젝트에서는 아래에 해당하는 기술 개발을 지원 대상으로 하지 않습니다.

- 확률적 유사 단일 광자 생성 기술에 관한 연구
- SPE 물질 합성과 특성 평가에 중점을 둔 기초 연구
- 기존 기술을 활용한 점진적 성능 향상 연구

4. 추진 일정

(프로그램 구조, 과제 구성)

한계도전전략센터는 SPEAR 프로젝트의 수행을 위해 선정 과제별 연간 6억원 내외의 예산 규모²¹⁾와 최대 3년 7개월의 연구 기간을 계획하고 있습니다. 본 프로젝트의 수행에 있어 전문성을 갖춘 연구자가 도전 의식을 가지고 연구에 몰입할 수 있도록, 1인의 연구 책임자 중심의 단독 과제 수행을 권장합니다. 과제 제안자는 센터가 계획하는 자원과 기간의 범위 내에서 상기 목표의 달성을 위한 독창적인 아이디어와 새로운 접근 방식, 연구 내용을 자유롭게 제시합니다.

본 과제는 각 단계별(19개월/12개월/12개월) 평가를 통해, 다음 단계 연구 수행에 대한 진행여부(Go/No-Go)가 결정될 것이며, 연구비는 책임PM의 연구 수행 내용 검토를 통해 가감 가능할 것입니다.

(기술 로드맵, 점진 평가 일정)

SPEAR 프로젝트는 단일 광자생성 기술의 혁신적인 시연, 검증 및 평가를 통해 양자통신을 비롯한 다양한 양자기술의 적용 확대를 가능하게 합니다. 제안자는 그림 3의 과제 추진 주요 일정을 참고하여, 수행 기간 전체에 걸쳐 연구개발 로드맵과 마일스톤 목표를 구체적으로 명시해야 합니다. 연구개발 로드맵에는 특정 작업 혹은 과제 수행 중간 단계에서 적용할 수 있는 성과 지표를 인용하여 세부 작업 분할을 제공해야 합니다. 제안자는 전체 프로그램 일정을 준수하고 모든 프로그램 목표, 지표, 중간 단계 및 최종 성과물을 완전히 해결하기 위한 공격적인 계획을 제시해야 합니다.

한계도전 사업에서는 목표 달성을 위해 책임PM이 수시로 연구 수행자와

21) 단계별 예산규모는 공고문을 참고

소통하며 매 분기 현장 방문과 전문가 패널 리뷰 미팅을 통해 연구 과정의 지식화와 진화적 Risk 관리를 계획하고 있습니다. 단계 점검을 통해 연구자가 설정한 마일스톤 목표가 달성되었는지 확인함으로써 다음 단계 연구 과제의 진행 여부를 결정할 수 있습니다. 프로젝트의 과급효과를 최대화하기 위해 도전적인 연구를 시도하는 과제를 선정하여 책임PM 중심의 협력·융합 연구를 추진합니다.

- 주요 일정



그림 3. SPEAR 프로젝트의 주요 일정

5. 제공 성과물

연구 책임자는 최소한 다음과 같은 성과물을 제공해야 합니다.

- 분기별 책임PM과의 회의(현장 방문, 전문가 리뷰)에서 연구 수행의 진척 상황을 파악할 수 있는 실험 데이터 및 결과 요약 자료
- 단계 점검일 10일 전까지 제출되어야 하는 단계 완료 보고서
- 과제 완료 시, 상온 단일 광자 발생기 프로토타입 시제품 및 동작 시연
- 연구 수행 과정에서의 의미있는 성과물 혹은 시행착오 대처 방안 등을 포함한 연구자의 목표 달성을 위한 노력을 입증하는 자료

6. 기타

(협업 관련)

본 프로젝트에서는 연구과제 심사를 통해 상이한 접근 방법으로 제안된 다수의 과제를 선정할 수도 있습니다. 한계도전전략센터는 본 프로젝트의 모

든 연구 수행자가 이 프로젝트의 목표 달성을 위해 협업할 것을 기대하며, 비록 접근 방식이 다를지라도 전문성에 기반한 상호 협력과 소통을 도모할 것입니다. 지적 재산권 혹은 이해상충의 문제가 없는 조건 하에서 투명성이 보장된 협업을 추진할 수 있습니다.