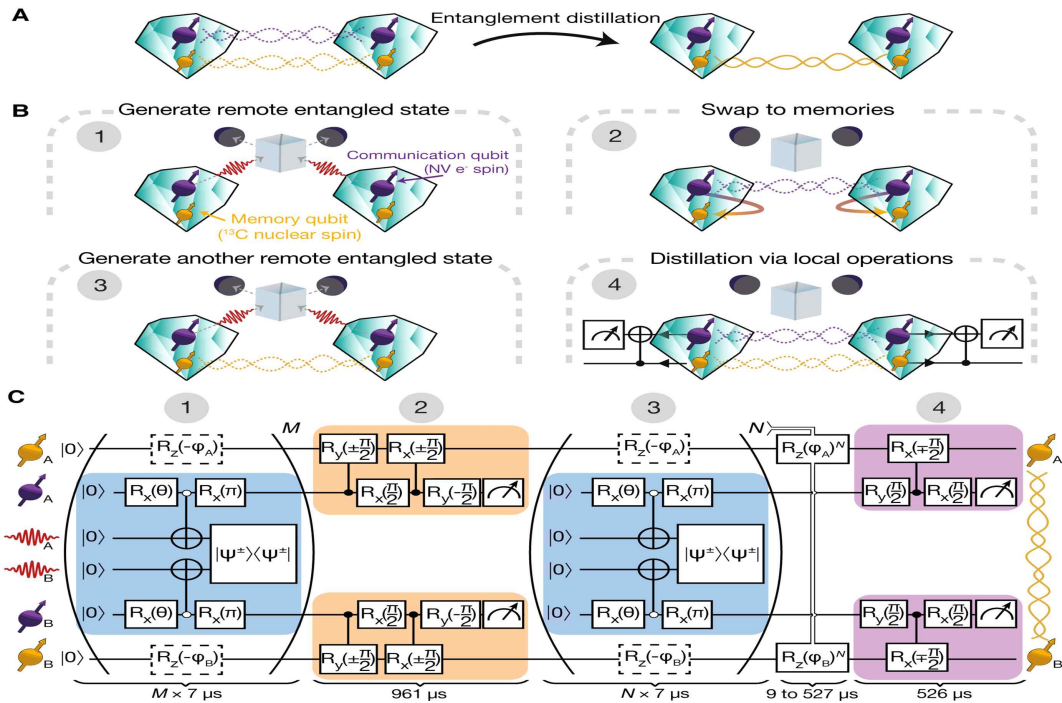


|   |   |         |
|---|---|---------|
| 관리번호  | 2025-양자통신-1   | (지정공모형) |
| 기술분류  | 대분류(양자)-중분류(양자통신)-소분류(양자통신프로토콜 및 응용)-세분류(양자오류정정)    |         |
| 중점분야  | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( ) |         |
| 기획유형  | 과괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )      |         |
| 과제명   | 양자 네트워크 얽힘 증류 프로토콜 및 응용기술 개발                        |         |
| 1. 개요   |   |         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 얽힘은 기존 정보기술의 한계를 극복하기 위한 양자정보처리 기술의 구현에 핵심적인 요소이며, 양자 네트워크 환경에서 얽힘의 생성, 분배 및 증류(distillation)/정제(purification) 과정을 통해 양자 네트워크 구현이 이루어짐</li> <li>○ 네트워크 상에서 얽힘 분배 과정에서 잡음 채널에 의해 잡음을 포함한 얽힘 공유가 됨. 다음으로 얽힘 증류/정제 과정은 낮은 순도의 얽힘을 높은 순도의 얽힘으로 변환하는 프로토콜에 해당하므로 얽힘 증류/정제 프로토콜은 네트워크에서 얽힘을 공유하기 위해 실질적으로 핵심적인 과정에 해당</li> <li>○ 얽힘 증류/정제 프로토콜은 네트워크 상에서 순도가 낮은 (혹은, 얽힘이 낮은) 얽힘에 대해서 국소 연산 (local operations) 및 통신을 통해 얽힘을 향상하는 과정이며, 이 때 활용되는 국소 연산의 구현을 위한 현재의 양자 기술은 잡음을 포함하여 최종적으로 완전한 얽힘을 증류하는 것은 불가능</li> <li>○ 최근 구현한 양자 얽힘 증류/정제 프로토콜 사례의 경우, 낮은 얽힘으로부터 조금 높은 순도의 얽힘을 증류하는 것을 시연하였으나, 최종적으로 잡음 없는 얽힘을 증류/정제하는 것은 양자 하드웨어에 존재하는 잡음으로 인해 매우 어려움</li> <li>○ 잡음을 수반한 양자 하드웨어의 환경에서 순도 높은 얽힘 증류/정제를 구현하는 프로토콜 및 기술 확보가 필요하며, 증류 전 얽힘의 존재 및 증류한 후 얽힘을 검증하는 과정을 통해 얽힘 증류/정제에 대한 검증 기술 필요</li> <li>○ 증류/정제한 얽힘을 활용한 양자 네트워크를 기반으로 한 양자 보안 통신 및 네트워크 통신 등 응용 프로토콜의 개발 필요</li> </ul> |   |         |



<개념도. 예시) 네덜란드 델프트 공대에서 구현한 얽힘 증류 프로토콜의 예 (N. Kalb et. al., Science 356, Issue 6341 928-932 (2017))>

## 2. 현황 및 필요성

### (기존 기술현황)

- 기존 얽힘 증류/정제 프로토콜[1]은 이론적인 문헌으로서 얽힘의 생성 및 분배 과정에서만 잡음을 고려하여 실제 활용성은 제한적이며 노드에서 다수의 국소 연산(양자상태 조작)을 수반하여 실제 환경에서 잡음 생성 비율이 높음
- 최근 얽힘 증류/정제의 구현[2]은 얽힘 증류에 필요한 양자 메모리 기술의 발전이 가능함을 제시하여 향후 얽힘 증류에 필요한 메모리의 성능이 기대되나 각 노드에서 수행하는 국소 연산(양자 상태 조작)의 경우 오류 비율을 포함
- 얽힘 증류/정제에서 국소 연산의 오류가 존재할 때 최종적으로 완전한 얽힘 증류/정제는 불가능 [3]
- 현재까지 얽힘 증류/정제 프로토콜에 대한 구현은 단대단 통신으로 제한적임

[1] C. H. Bennet et al. Purification of Noisy Entanglement and Faithful Teleportation via Noisy Channels, Phys.Rev.Lett.76:722-725 (1996).

[2] N. Kalb et al., Entanglement Distillation between Solid-State Quantum Network Nodes, Science, 356, 928-932 (2017).

[3] A. Zang, No-Go Theorems for Universal Entanglement Purification, Phys. Rev. Lett. 134, 190803 (2025).

(필요성)

- 실제 환경에서 발생 가능한 모든 잡음을 고려한 얽힘 증류/정제 프로토콜의 개발이 필요하며 향후 양자 메모리, 양자 중계기 등 얽힘 증류/정제를 위한 요소 기술들이 발전하는 경우 잡음 환경을 고려하여 실제로 구현 가능하고 얽힘을 증류/정제할 수 있는 새로운 얽힘 증류/정제 프로토콜이 요구됨
- 단대단 통신 뿐 아니라 다체계 양자 네트워크의 잡음 환경을 고려한 얽힘 증류/정제 프로토콜이 필요하며, 프로토콜의 효율성 극대화 필요.
- 국가에서 구축하는 양자 생태계 통신 기술 핵심은 양자 네트워크이며 이 때 얽힘을 생성 및 공유하는 얽힘 증류/정제 프로토콜은 양자메모리, 양자중계기, 얽힘 생성 및 분배 등의 구현을 연계하여 얽힘 네트워크 구축을 가능하게 할 것으로 기대

### 3. 주요분석

- (주요 수요처) 양자 네트워크 기반 및 응용을 활용하는 정부·공공 기관, 통신 및 양자 IT 산업계와 연구개발기관
- (협력방안)
  - 수요처와 협력하여 양자 통신 실증 노드 구축에 개발 기술 적용을 추진하고 통신 인프라와의 연계 실증을 통해 고신뢰 양자 시스템을 구현함
  - 주요 통신사업자 및 소자장비업체와 협력하여, 양자 인프라를 기반으로 장거리 전송 실증 플랫폼을 공동 구축 가능함
  - 국내 주요 연구기관 및 대학과 협력을 통해 전문인력 양성하고 개방형 실증 인프라와 양자 시스템 개발 역량을 확충할 수 있음

### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
  - 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원

○ 최종목표(3단계) : 잡음 환경에서 얽힘 분배 및 증류/정제를 위한 양자 프로토콜 개발과 실증 및 얽힘 기반 네트워크를 활용한 통신 및 응용 프로토콜 개발

- 정제된 얽힘 기반 네트워크를 활용한 통신 및 응용 프로토콜 개발 (2개 이상)
- 얽힘 기반 양자 통신 시스템의 검증 성능 관련 표준 제안 및 승인
- 개발한 얽힘 증류 프로토콜에 대해 실제 환경(3노드)에서의 적용 시연

○ 2단계 목표 : 정제화된 얽힘 네트워크를 위한 얽힘 증류/정제 및 얽힘 성능 검증 프로토콜 개발

- 잡음 환경하에서 얽힘 증류/정제 프로토콜 개발
- 얽힘 증류/정제 프로토콜에 대한 성능 지표 및 효율적인 얽힘 검증 방법 개발
- 개발한 얽힘 증류 프로토콜에 대해 실제 환경(2노드)에 기본 PoC (Proof of Concept) 시연

○ 단계별 목표

| 구분             | 단계별 연구목표  |
|----------------|---|
| 1단계<br>(25~27) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 잡음 환경에서 높은 순도의 얽힘으로 증류/정제할 수 있는 얽힘 증류/정제 프로토콜 개발 및 실증</li> <li>- 얽힘의 양을 효과적으로 증가시키는 얽힘 활성화 프로토콜 개발</li> <li>- 얽힘 증류/정제의 성능 측정이 가능한 효율적인 얽힘 검증 기술 개발</li> </ul> |
| 2단계<br>(28~29) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 얽힘 증류/정제 프로토콜에 대한 얽힘 성능 측정 및 얽힘 검증 기술 개발: 얽힘의 증류 여부, 증류된 얽힘에서의 잡음의 양 등 얽힘 성능 검증</li> <li>- 다체계 확장 가능한 잡음 환경 얽힘 증류 프로토콜 개발</li> </ul>                           |
| 3단계<br>(30~32) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다중 노드 양자 얽힘 증류/정제 및 네트워크 프로토콜 개발</li> <li>- 정제된 얽힘 기반 양자 네트워크 활용 프로토콜 개발(2건 이상)</li> </ul>   |

○ 정량적 연구개발목표

| 성능지표 |  | 단위                   | 연구개발 목표치       |                |                | 연구개발 전<br>국내 수준 | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관)          |
|------|--|----------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------------------------------|
|      |  |                      | 1단계<br>(25~27) | 2단계<br>(28~29) | 3단계<br>(30~32) |                 |                                |
| 1    | 얽힘 증류/정제 프로토콜에 대한 허용 가능한(tolerable) 하드웨어의 잡음 정도  | %                    | 5%             | 10%            | 10%            | -               | 없음                             |
| 2    | 잡음 환경에서 얽힘 증류/정제 프로토콜 개발                         | 노드 개수                | 2              | 2 이상           | 3 이상           | -               | 2<br>(미국/Arizona, 잡음이 없는 경우)   |
| 3    | 얽힘 증류/정제 프로토콜 전 증류 가능한 얽힘 검증 방법 (@하드웨어 잡음 5% 이상) | 검증 얽힘<br>상태 종류<br>개수 | 1              | 2              | 2              | -               | 2.<br>(폴란드/Gdansk, 잡음 고려하지 않음) |

|   |  |             |   |   |              |   |   |
|---|--|-------------|---|---|--------------|---|---|
| 4 | 업힘 증류/정제 프로토콜 후 업힘 검증 방법               | 프로토콜 건수(표준) | - | 1 | 1<br>(표준 승인) | - | 없음<br>(독일 / Hamburg, 일반적 양자 업힘 검증)      |
| 5 | 업힘 증류 및 정제 기반의 양자 네트워크 통신 및 응용 프로토콜 개발 | 프로토콜 건수     | - | - | 2            | - | 1개<br>(미국/UIUC, 2-to-1 다중접속 채널 프로토콜 개발) |

\* 위의 성능목표 표 외에도 정량적 성능지표 자율제시(플랫폼/프로토콜에 따라 재산정도 가능)

## 5. 연구내용

### o 전체(1~3단계) 연구내용

- ① 업힘 증류/정제 성능 검증 기술 개발
  - 업힘 증류/정제 가능 임계 조건 및 환경 연구
  - 효율적인 다자간 업힘 검증 기술 개발
  - 결함 없는 업힘 검증 기술 개발
- ② 잡음 환경에서 업힘 증류/정제 프로토콜 개발
  - 효율적인 업힘 증류/정제 프로토콜 개발
  - 다자간 업힘 증류/정제 프로토콜 개발
  - 업힘 증류/정제 프로토콜이 PoC(Proof of Concept) 적용 시연(3노드)
- ③ 업힘 기반 양자 네트워크 활용 프로토콜 개발(2건 이상)
  - 3노드, 100km 정제화된 양자 업힘 네트워크 활용 기술 개발
  - 증류/정제된 업힘 기반 보안 통신 프로토콜 개발

### o 1~2단계까지 연구내용

- ① 업힘 증류/정제 성능 검증 기술 개발
  - 업힘 증류/정제 가능 임계 조건 및 환경 연구
  - 효율적인 다자간 업힘 검증 기술 개발
- ② 잡음 환경에서 업힘 증류/정제 프로토콜 개발
  - 효율적인 업힘 증류/정제 프로토콜 개발
  - 다자간 업힘 증류/정제 프로토콜 개발
  - 개발 업힘 증류/정제 프로토콜의 PoC(Proof of Concept) 적용 시연(2노드)

## 6. 기대 효과

### ○ 과학기술적 파급효과

- 양자정보처리의 핵심이 되는 얽힘을 효율적으로 정제하는 프로토콜을 개발하여 얽힘 기술 검증 및 응용성 극대화
- 얽힘 정제를 통해 양자 통신과 함께 양자 시뮬레이션, 양자 컴퓨팅 등의 다양한 양자정보처리 구현 가능하며, 양자 오류 정정 기술로 응용 가능

### ○ 경제적 파급효과

- 얽힘 정제 프로토콜을 통해 양자 통신, 양자 센싱, 양자 컴퓨팅 네트워크 구현의 기반 연구로 양자 경제 활성화에 기여 가능

### ○ 사회적 기대효과

- 얽힘을 통한 궁극적인 양자 보안 시스템에 적용 가능
- 양자 통신 네트워크 프로토콜을 통해 분산형 양자 시스템 구현 및 초연결, 초효율 시스템에 기여

## 7. 지원기간/예산/추진체계

### ○ 연구개발기간 : 8년 이내

### ○ 정부지원연구개발비 : '25년 5.8억원 이내

- 1~2단계까지 정부지원연구개발비 47.36억원 이내
- 3단계까지 총 정부지원연구개발비 75.77억원 이내

※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  |     | 기간             | 개월수  | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월  | 580백만원    |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월  | 1,090백만원  |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월 | 1,022백만원  |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월 | 1,022백만원  |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월 | 1,022백만원  |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월 | 947백만원    |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월 | 947백만원    |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월 | 947백만원    |
| 합계  |     | -              | 87개월 | 7,577백만원  |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

○ 주관기관 : 제한없음

- 1~2단계 산업계 참여 권고, (3단계~) 산업계 참여 필수

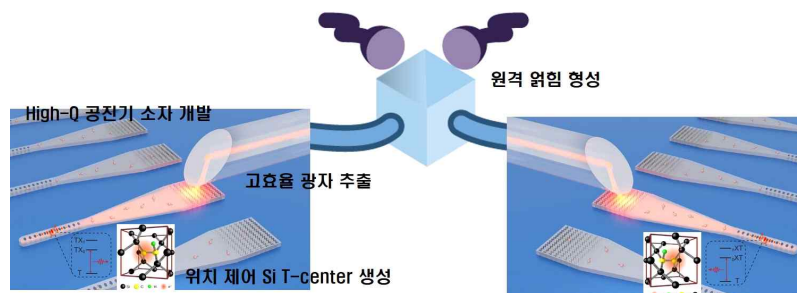
\* 3단계 산업계 참여 계획을 반드시 포함하여 제시할 것(참여형태 : 주관/공동/위탁연구개발기관)

| 연구유형          | 기초연구 (    ), 응용연구 ( √ ), 개발연구 (    )   | TRL ( 3 )~( 5 )단계 |
|---------------|--|-------------------|
| 과제특징          | 경쟁형(    ), 경쟁형(챌린지)(    ), SW자산뱅크등록(    ), 공개SW(    ), 기술료비징수(    ), 국제협력R&D(    ), 정책지정(    ), 혁신도약형(○), 표준화연계(○), 사회문제해결형(    ), 일자리연계(    ), 소재부품장비(    ), 규제샌드박스(    ), 연구데이터공개(    ), 사업화연계(    ), IP-R&D연계(    ) |                   |
| 구분            |  | 성명                |
| 책임PM(과제기획위원장) |  | 양자 PM 오윤제         |
| 담당 팀장         |  | 양자기술·산업팀 이민경      |

|           |   |                    |
|-----------|---|--------------------|
| 관리번호      | 2025-양자통신-2   | (지정공모형, 병렬형 총괄/세부) |
| 기술분류      | 대분류(양자)-중분류(양자통신)-소분류(양자네트워크)-세분류(양자중계기)            |                    |
| 중점분야      | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( ) |                    |
| 기획유형      | 파괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )      |                    |
| 총괄<br>과제명 | CMOS 호환 양자메모리 기반 양자 중계기 원천기술 개발                     |                    |
| 세부<br>과제명 | (총괄/세부1) CMOS 호환 양자메모리 기반 양자 중계기 핵심 소자 기술 개발        |                    |

## 1. 개요

- 현대 반도체 집적 기술의 핵심인 CMOS 공정이 적용 가능한 고체 양자중계기 기술을 개발함
- CMOS 호환 반도체 양자 광원, 양자메모리(스핀 큐비트), 스핀-광자 얽힘 등의 양자 중계기 기술을 개발함
- 실리콘 T-센터 등 실리콘 내 존재하는 점결함 기술이 최근 다수 보고 되고 있으며, 광통신 O-밴드(1310nm 파장대역) 방출 파장과 CMOS 호환의 장점이 결합되어 연구자들의 많은 관심을 받고 있음



< CMOS 호환 양자중계기 개념도 >

## 2. 현황 및 필요성

- (기존 기술현황)
  - 고체 기반 플랫폼 중 긴 수명의 양자메모리를 기반으로 양자 인터넷 응용이 가능한 플랫폼으로는 반도체 점결함, 다이아몬드 점결함(NV 센터, SiV 센터), 희토류 등이 있음. 특히 다이아몬드 NV 센터는 3개 노드 원격 얽힘에 성공하는 등 양자 인터넷 연구 개발을 보고하였지만 절연체에 가까운 특성 때문에 공정 제작의 어려움, 성능의 한계 등이 있으며 대규모 제작과 같은 현대 반도체 공정의 장점을 활용하기 어려운 점이 있음



○ (필요성)

- 실리콘 혹은 실리콘과 유사한 반도체 기반 플랫폼은 반도체 공정을 적극 활용할 수 있으며, 특히 산화막 생성이 가능한 소재의 경우 현대 반도체 집적 기술의 핵심인 CMOS 기술 적용 가능
- 즉, 현대 반도체 공정의 핵심 기술을 그대로 활용할 수 있기에 집적화, 대량 생산, 소형화에 매우 유리함
- CMOS 호환 양자 네트워크 디바이스 연구개발은 비교적 최근 들어 주목할 만한 연구 결과가 발표됨

### 3. 수요분석

○ (주요 수요처)

- 통신사업자 및 ETRI, KIST, ADD 등 국가 양자 백본 네트워크용 노드 기술 개발 연구처, 양자 보안통신망 기술 확보 기업, 양자 소자 기반 집적 기술 확보 기업

○ (협력방안)

- 정부출연연구소 및 학교 중심으로 CMOS 호환 실리콘 스핀 큐비트 양자 중계기 기술 개발 및 테스트베드 제공 및 기술 검증 공동연구 추진, 산업계와 협력하여 field 테스트용 소형 양자노드 모듈 공동 제작, silicon 기반 CMOS 호환 공정 공동 개발 추진

### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
  - 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원
- 본 RFP는 병렬형 총괄/세부 과제 유형으로 총괄/세부1 과제임. 세부2 과제와 협력방안을 제시할 것

#### □ 총괄과제

- **최종목표(3단계) : CMOS 호환 실리콘 스핀 큐비트(실리콘 T-센터) 양자중계기 시작품 개발 및 정제화된 양자 얽힘 네트워크 실환경 검증**

- CMOS 호환 실리콘 스핀 큐비트 양자중계기 시작품 개발 (CMOS 호환 양자중계기 결맞음 시간 : 2ms 이상)

- CMOS 호환 양자 중계기 3노드, 100km 양자얽힘 네트워크 실환경 검증

○ 2단계 목표 : CMOS 호환 실리콘 스핀 큐비트 양자 메모리 및 고순도 28Si 웨이퍼 소재 개발

- CMOS 호환 실리콘 스핀 큐비트 양자 메모리 결맞음 시간 : 1 ms 이상 (세부1)
- 고순도 28Si 웨이퍼 소재( 29동위원소 농도: 100ppm 이하, 28Si Epi 면적: 2 x 2 cm<sup>2</sup> 이상) (세부2)

□ 총괄/세부 1 과제

○ 최종목표(3단계) : CMOS호환 실리콘 스핀 큐비트(실리콘 T-센터) 양자 중계기 기반 3노드 100km 양자 얽힘 네트워크 실환경 검증

- CMOS 호환 실리콘 스핀 큐비트 양자 중계기 결맞음 시간 : 2ms 이상
- CMOS 호환 양자 중계기 3노드, 100km 양자얽힘 네트워크 실환경 검증

○ 2단계 목표 : CMOS 호환 실리콘 스핀 큐비트 반도체 소재 기반 양자 네트워크 핵심 소자 개발

- CMOS 기술 적용이 가능한 반도체의 점결함 등 준원자 물리계를 이용하여 양자 인터넷에 활용가능한 양자 중계기 집적 소자 플랫폼 핵심 기술 확보
- CMOS 호환 실리콘 스핀 큐비트 양자 메모리 결맞음 시간 : 1ms 이상

○ 단계별 목표

| 구분               | 단계별 연구목표   |
|------------------|--|
| 1단계<br>(‘25~’27) | CMOS 호환 실리콘 스핀 큐비트(실리콘 T-센터) 양자 얽힘 광집적 소자 설계 및 제작 기술 개발  |
| 2단계<br>(‘28~’29) | CMOS 호환 실리콘 스핀 큐비트 양자 메모리 및 양자 중계기 스핀-광자 얽힘 기술 개발<br>(CMOS 호환 실리콘 스핀 큐비트 양자메모리 결맞음 시간 1 ms 이상, 2노드 동작)                       |
| 3단계<br>(‘30~’32) | CMOS 호환 실리콘 스핀 큐비트 양자 중계기 기반 3 노드, 100km 얽힘 네트워크 구현<br>(CMOS호환 실리콘 스핀 큐비트 양자중계기 동작 검증, 결맞음 시간 2ms 이상, 3노드 동작, 100km 이상 전송 등) |

## ○ 정량적 연구개발목표

| 성능지표 |                                  | 단위  | 연구개발 목표치       |                |                | 연구개발 전<br>국내 수준 | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관)                                |
|------|----------------------------------|-----|----------------|----------------|----------------|-----------------|--|
|      |                                  |     | 1단계<br>(25~27) | 2단계<br>(28~29) | 3단계<br>(30~32) |                 |  |
| 1    | 결맞음 시간                           | ms  | 0.001          | 1              | 2              | -               | 2<br>(캐나다/Simon Fraser Univ.), [1] 개별 성능치            |
| 2    | Purcell factor                   | -   | -              | 6              | 10             | -               | 6.89<br>(미국/Rice Univ.), [2]개별 성능치                   |
| 3    | 광자 생성 속도<br>(실리콘 스핀-광자<br>양자메모리) | kHz | 4              | 50             | 75             |                 | 73.3<br>(미국/Rice Univ.), [2]개별 성능치, 1노드,<br>스핀 실험 없음 |
| 4    | 원격 얽힘 노드 수                       | -   | -              | 2              | 3              | -               | 없음   |
| 5    | 전송 거리                            | km  | -              | -              | 100            |                 | 없음   |

\* 위의 성능목표 외에도 정량적 성능지표 자율제시

[1] 결맞음 시간 : Bergeron, L. et al. Silicon-integrated telecommunications photon-spin interface. PRX Quantum 1, 020301 (2020)

[2] Purcell factor 및 광자 카운트 : Johnston, A. et al. Cavity-coupled telecom atomic source in silicon. Nat Commun 15, 2350 (2024). (스핀 실험 결과 없음)

## 5. 연구내용

### ○ 전체(1~3단계) 연구내용

#### ① 스핀-광자 얽힘 생성기술

- 점결합 광자 생성 기술
- 광자의 미세 파장 특성 제어 가능한 Si T-center 생성
- 점결합 위치 제어 기술
- 방출 광자와 스핀 양자메모리간 얽힘 구현

#### ② 나노포토닉 광공진기 집적소자 제작 기술

- 스핀-광자 얽힘 기술 효율의 개선을 위한 광 공진기 등 광소자 제작 및 광소자와  
준원자 결합 집적화 기술
- high-Q 공진 구조 소자 개발 및 고효율 광자 추출 기술 개발

#### ③ 실리콘 스핀 큐비트 양자메모리 제어 기술

- 광자와 상호 작용(스핀-광자) 인터페이스 제어 기술
- 결맞음 시간 향상을 위한 제어 기술 개발
- 실리콘 스핀 양자메모리 (집적형) 파장 가변 광원 인터페이스 및 편광 제어 기술

④ 스핀 큐비트 원격 얽힘 구현 기술

- 광자 큐비트 간섭 기술
- 광선로 및 광자 위상 안정화 기술
- 양자 메모리 얽힘 큐비트 기술

⑤ CMOS 호환 실리콘 스핀 큐비트 양자 중계기 기반 3노드, 100km 얽힘 네트워크 실증 기술

- CMOS 호환 양자 중계기 3노드 구축 기술
- 3노드 기반 양자 중계 네트워크 및 100km 이상 전송 기술 개발
- 얽힘 정제 이용 양자 얽힘 충실도 개선 기술 개발

o 1~2단계까지 연구내용

① 스핀-광자 얽힘 생성기술

- 점결함 광자 생성 기술
- 광자의 미세 파장 특성 제어 가능한 Si T-center 생성
- 점결함 위치 제어 기술
- 방출 광자와 스핀 양자메모리간 얽힘 구현

② 나노포토닉 광공진기 집적소자 제작 기술

- 스핀-광자 얽힘 기술 효율의 개선을 위한 광 공진기 등 광소자 제작 및 광소자와 준원자 결합 집적화 기술
- high-Q 공진 구조 소자 개발 및 고효율 광자 추출 기술 개발

③ 실리콘 스핀 큐비트 양자메모리 제어 기술

- 광자와 상호 작용(스핀-광자) 인터페이스 제어 기술
- 결맞음 시간 향상을 위한 제어 기술 개발
- 실리콘 스핀 양자메모리 (집적형) 파장 가변 광원 인터페이스 및 편광 제어 기술

④ 스핀 큐비트 원격 얽힘 구현 기술

- 광자 큐비트 간섭 기술
- 광선로 및 광자 위상 안정화 기술
- 양자 메모리 얽힘 큐비트 기술

| <b>6. 기대 효과</b>  |   |                |           |          |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
|--|---|----------------|-----------|----------|---------------|-------|-----|----------------|----------|----------|-----|----------------|-----|----------|-----|----------------|------|----------|-----|-----|----------------|------|----------|-----|----------------|------|----------|-----|-----|----------------|------|----------|-----|----------------|------|----------|-----|----------------|------|----------|----|---|------|-----------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 양자 인터넷 실현에 필요한 양자 중계기 핵심 기술을 반도체 소재에서 실현하여 산업화에 유리한 플랫폼 선점</li> <li>○ 대량 생산 및 소형화, 집적화에 유리한 반도체 기반의 양자 중계기 기술을 확보하여 양자정보 기술 산업화 가속</li> <li>○ 양자 네트워크를 활용한 양자 이득의 실현</li> <li>○ 선진국 중심의 양자 기술 경쟁에서 우위 확보</li> </ul>   |   |                |           |          |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
| <b>7. 지원기간/예산/추진체계</b>   |   |                |           |          |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 연구개발기간 : 8년 이내</li> <li>○ 정부지원연구개발비 : '25년 10.34억원 이내 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1~2단계까지 정부지원연구개발비 81.04억원 이내</li> <li>- 3단계까지 총 정부지원연구개발비 142.60억원 이내</li> </ul> </li> </ul> <p>※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음</p>   |   |                |           |          |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>구분</th> <th>기간</th> <th>개월수</th> <th>정부지원연구개발비</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">1단계</td> <td>1년차</td> <td>'25.10월~'26.3월</td> <td>6개월</td> <td>1,034백만원</td> </tr> <tr> <td>2년차</td> <td>'26.4월~'26.12월</td> <td>9개월</td> <td>1,940백만원</td> </tr> <tr> <td>3년차</td> <td>'27.1월~'27.12월</td> <td>12개월</td> <td>1,710백만원</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">2단계</td> <td>4년차</td> <td>'28.1월~'28.12월</td> <td>12개월</td> <td>1,710백만원</td> </tr> <tr> <td>5년차</td> <td>'29.1월~'29.12월</td> <td>12개월</td> <td>1,710백만원</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">3단계</td> <td>6년차</td> <td>'30.1월~'30.12월</td> <td>12개월</td> <td>2,052백만원</td> </tr> <tr> <td>7년차</td> <td>'31.1월~'31.12월</td> <td>12개월</td> <td>2,052백만원</td> </tr> <tr> <td>8년차</td> <td>'32.1월~'32.12월</td> <td>12개월</td> <td>2,052백만원</td> </tr> <tr> <td>합계</td> <td>-</td> <td>87개월</td> <td>14,260백만원</td> </tr> </tbody> </table> |   | 구분             | 기간        | 개월수      | 정부지원연구개발비     | 1단계   | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월      | 1,034백만원 | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월 | 1,940백만원 | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월 | 1,710백만원 | 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월 | 1,710백만원 | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월 | 1,710백만원 | 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월 | 2,052백만원 | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월 | 2,052백만원 | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월 | 2,052백만원 | 합계 | - | 87개월 | 14,260백만원 |
| 구분   | 기간  | 개월수            | 정부지원연구개발비 |          |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
| 1단계  | 1년차   | '25.10월~'26.3월 | 6개월       | 1,034백만원 |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
|  | 2년차   | '26.4월~'26.12월 | 9개월       | 1,940백만원 |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
|  | 3년차   | '27.1월~'27.12월 | 12개월      | 1,710백만원 |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
| 2단계  | 4년차   | '28.1월~'28.12월 | 12개월      | 1,710백만원 |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
|  | 5년차   | '29.1월~'29.12월 | 12개월      | 1,710백만원 |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
| 3단계  | 6년차   | '30.1월~'30.12월 | 12개월      | 2,052백만원 |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
|  | 7년차   | '31.1월~'31.12월 | 12개월      | 2,052백만원 |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
|  | 8년차   | '32.1월~'32.12월 | 12개월      | 2,052백만원 |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
| 합계   | -   | 87개월           | 14,260백만원 |          |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
| <p>* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 주관기관 : 제한없음 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1~2단계 산업계 참여 권고, (3단계~) 산업계 참여 필수</li> </ul> </li> </ul> <p>* 3단계 산업계 참여 계획을 반드시 포함하여 제시할 것(참여형태 : 주관/공동/위탁연구개발기관)</p>  |   |                |           |          |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
| <b>연구유형</b>  | 기초연구 (    ), 응용연구 (    √    ), 개발연구 (    ) <b>TRL (3)~(5)단계</b>   |                |           |          |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
| <b>과제특징</b>  | 경쟁형(    ), 경쟁형(챌린지)(    ), SW자산뱅크등록(    ), 공개SW(    ), 기술료비징수(    ), 국제협력R&D(    ), 정책지정(    ), 혁신도약형(○), 표준화연계(    ), 사회문제해결형(    ), 일자리연계(    ), 소재부품장비(    ), 규제샌드박스(    ), 연구데이터공개(    ), 사업화연계(    ), IP-R&D연계(    ) |                |           |          |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>구분</th> <th>기술분야명/팀명</th> <th>성명</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>책임PM(과제기획위원장)</td> <td>양자 PM</td> <td>오윤제</td> </tr> <tr> <td>담당 팀장</td> <td>양자기술·산업팀</td> <td>이민경</td> </tr> </tbody> </table>  |   | 구분             | 기술분야명/팀명  | 성명       | 책임PM(과제기획위원장) | 양자 PM | 오윤제 | 담당 팀장          | 양자기술·산업팀 | 이민경      |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
| 구분   | 기술분야명/팀명  | 성명             |           |          |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
| 책임PM(과제기획위원장)  | 양자 PM   | 오윤제            |           |          |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |
| 담당 팀장  | 양자기술·산업팀  | 이민경            |           |          |               |       |     |                |          |          |     |                |     |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |     |                |      |          |     |                |      |          |     |                |      |          |    |   |      |           |

|  |   |                    |
|--|---|--------------------|
| 관리번호   | 2025-양자통신-3   | (지정공모형, 병렬형 총괄/세부) |
| 기술분류   | 대분류(양자)-중분류(양자통신)-소분류(양자통신프로토콜 및 응용)-세분류(양자오류정정)    |                    |
| 중점분야   | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( ) |                    |
| 기획유형   | 파괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )      |                    |
| 총괄<br>과제명  | CMOS 호환 양자메모리 기반 양자 중계기 원천기술 개발                     |                    |
| 세부<br>과제명  | (세부2) 고순도 28Si 웨이퍼 제작기술 개발                          |                    |
| 1. 개요  |   |                    |
| <p>○ 실리콘 웨이퍼에서 28Si은 핵스핀을 갖고 있는 29Si를 제거함으로써 다양한 장점을 가짐</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- 실리콘 T-, G-, W-센터등 실리콘 내 존재하는 점결함 기술이 최근 다수 보고 되고 있으며, 광통신 O-밴드(1310 nm 파장대역) 방출 파장과 CMOS 호환의 장점이 결합되어 연구자들의 많은 관심을 받고 있음. 이에 2018년도부터 해외에서는 Si 센터 기반 단광자 연구, 2022년부터는 SOI 상에서 CQED 연구, 2024년부터는 CMOS 호환 Si 상 cavity 광회로 기반 확정적 광자원 연구를 수행중임. 즉, 국제 연구 동향을 고려할 때, 본 기술 개발은 시의성이 높으며 현재 착수하더라도 세계적 경쟁력 확보가 가능함</li><li>- 또한, 양자 메모리의 결맞음을 방해하는 자기장 잡음 줄이고, 동위원소로부터 비롯되는 local bandgap 및 binding energy 불균일성을 최소화할 수 있음. 하나의 28Si 소재에서 광자 큐비트(photonic qubit)과 스핀 큐비트(spin qubit)를 모두 구현하고 대한민국의 강점인 Si 나노 공정을 적극적으로 활용할 수 있음</li></ul> |   |                    |
| <div><p>T center (1.32μm)<br/>≈0.9 μs lifetime</p><p>A</p><p>● Si ● C ● H ● e<sup>-</sup></p><p>D.B. Higginbottom et al, Nature 2022<br/>S. Simmons's group at SFU + Photonic Inc</p></div> <p>※ [그림, T센터의 구조, 출처 Nature 607 266-270 (2022)]</p>   |   |                    |
| 2. 현황 및 필요성  |   |                    |

○ (기존 기술현황)

- 해외(유럽·미국)은 대규모 qubit을 위한 차세대 양자 소재로서 28Si 개발을 선제적으로 추진하고 있으나, 국내는 28Si 정제에서 기판 소재까지 전주기 공급망이 부재 [All-Si 양자광회로: Nat. Photon 12, 534-539 (2018), G-센터 :Phys. Rev B, 97, 035303 (2018), W-센터: ACS photonics 9, 2337-2345 (2022), T-센터: Nature 607 266-270 (2022) 등]
- 국내에도 28Si 기반 광자 및 spin qubit 연구자는 존재하나, 소재를 전량 국외 의존하고 있으며, 연구 발전 및 국제 기술 경쟁 심화에 따라 국내 연구자들이 고품질 소재 확보에 어려움을 겪고 있음

○ (필요성)

- 우리나라는 Si 나노 소자 공정 및 소재에 대한 국제적 선도국이나, 본 28Si에 대해서는 소재 정제 및 전주기 공급망이 부재함. 특히 핵심 고순도 소재 제작 장치인 Si 전용 MBE(Molecular Beam Epitaxy, 분자선 에피택시)가 국내에는 전혀 구축되어 있지 않음. 이에 28Si 박막 소재 생산을 위한 전용 고순도 Si MBE를 국내에서 설계·제작·설치하고, 28Si, Ge, SiGe 박막 성장 연구를 수행할 필요가 있음. 또한, 상기 소재를 국내 연구자에게 안정적으로 공급할 수 있는 공급망 확보가 필요함
- 본 소재는 CMOS 공정에 호환 가능(compatible)하므로, 소재만 공급 가능하다면 우리나라는 기존 Si 공정 산업 인프라를 활용하여 타국을 생산력 측면에서 압도할 잠재력을 보유함. 이에 따라 미래의 선도 양자기술 소재의 국내 자급화를 추진하고자 함. 또한, 본과제는 국내 반도체 기업에서 대량생산을 위한 구경 30 cm급 28Si MBE 설치 투자 독려를 위한 선행 소재 생산 및 특성 분석 연구를 수행함

### 3. 수요분석

○ (주요 수요처)

- 국내 주요 정부출연기관, 국방연구기관 등 국가 양자 백본 네트워크용 노드 기술 개발 연구기관, 서울대, KAIST 등 대학, 통신사업자 등의 양자 보안통신망 기술 확보 기업 등 양자 소자 기반 집적 기술 확보 기업

○ (협력방안)

- (총괄/세부1) “CMOS 스핀-광자 얽힘 및 양자 중계기 기술 개발” 과제와 직접적 협력을 통해, 1단계 후반인 2027년 이전에 총괄/세부1 과제에 28Si on SOI 또는 28Si on natural Si 소재 공급을 진행하고, 2단계 목표를 협업을 통해 수행해야 함. 특히 purcell 효과 구현을 위해 Bulls' eye 등 광회로 구조와 결합하여  $g^{(2)}(0)$  측정을 수행할 필요가 있음

### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
  - 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원
- 본 RFP는 병렬형 총괄/세부 과제 유형으로 세부2 과제에 해당함. 총괄과제와 협력방안을 제시할 것.

## □ 세부2 과제

- 최종목표(2단계) : CMOS 호환(CMOS-compatible) 28Si 기반 저밀도/고립형 점결함 기반 양자메모리 구현을 위한 고품질 소재 개발 및 공급
  - 초고순도 농축 정제 28Si 에피 성장 기술 개발 (29Si 동위원소 농도 100 ppm 이하 & 에피 면적  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  이상)
  - 고순도 단일광자 방출이 가능한 28Si 기반 양자광원 개발 ( $g^{(2)}(0) < 0.1$  이하)
  - O-band 파장에서 동작하는 저밀도 T-센터 기반 28Si 기반 소재의 안정적인 공급

### ○ 단계별 목표

| 구분  | 단계별 연구목표  |
|-----|---|
| 1단계 | 초고순도 농축 정제 28Si 박막 제작용 MBE 설계·제작·설치·운영<br>- 28Si 전용 MBE를 제작·설치 후, Si 박막 내 29Si의 농도가 800 ppm 이하임을 확인<br>- 28Si on SOI 또는 28Si on natural Si 성장 [면적 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 이상]<br>- T-센터 구현 조건 확보 [제1세부 과제와 협력]  |
| 2단계 | 28Si 호스트 내 점결함 생성 기술 개발<br>- 28Si 전용 MBE를 제작·설치 후 박막 내 29Si의 농도 100 ppm 이하임을 확인<br>- 28Si on SOI 또는 28Si on natural Si 성장 [면적 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 이상]<br>- 저밀도 T-센터 제작 및 광학 특성 측정을 위한 광추출 구조 개발 [제1세부 과제와 협력]<br>- $g^{(2)}(0) < 0.1$ 수준의 순수도를 갖는 확정적 광원 시현 [제1세부 과제와 협력] |

### ○ 정량적 연구개발목표

| 성능지표 |                                    | 단위  | 연구개발 목표치    |             | 연구개발 전 국내 수준 | 세계 최고수준 (보유국/보유기관)                                       |
|------|------------------------------------|-----|-------------|-------------|--------------|--|
|      |                                    |     | 1단계 (25~27) | 2단계 (28~29) |              |  |
| 1    | - 초고순도 농축 정제 28Si 박막의 29Si 동위원소 농도 | ppm | <800        | <100        | -            | <100<br>(농축순도는 10 ppm 이하 가능하나 실용적으로 100 ppm 이하. 프랑스/러시아) |



|   |                           |                 |  |   |   |   |
|---|---------------------------|-----------------|--|---|---|---|
| 2 | 28Si Epi 면적               | cm <sup>2</sup> | >1x1   | >2x2  | - | 지름 30 cm<br>(LETI/프랑스는<br>대규모 국가 투자중)<br>[한국은 소규모<br>선행투자중임을<br>고려]                               |
| 3 | 28Si 전용 MBE               | EA              | 1  | 1   | 0 | 다수  |
| 4 | O-band 내 Si 센터의<br>광자 순수도 | $g^{(2)}(0)$    | <0.5   | <0.1  | - | <0.1 @ W-센터<br>SOI광회로 사용<br>(CNRS <sup>[1]</sup> )<br><0.1 @ T-센터<br>(Rice Univ. <sup>[2]</sup> ) |
| 5 | SOI상 28Si 센터<br>구조 개발     | 센터/밀도           | 광섬유통신<br>대역으로 spin이<br>존재하는 센터<br>포함 1개 이상<br>결함조건 획득.<br>밀도 항목 없음 | 1단계 획득<br>결함을<br>단일개의<br>광학 추적<br>및 광추출<br>공정<br>[예: 1<br>개/um <sup>2</sup> 이하] | - | 실리콘 T-센터*,<br>(실리콘 G 센터,<br>실리콘 W-센터 등은<br>옵션)<br>(CNRS)  |

\* 위의 성능목표 외에도 정량적 성능지표 자율제시

\* G: C-C pair 결함 중심, G\*: 변형된 C-C 결함 복합체, T: C-H 결함 중심, W: Si 3중 vacancy

[1] Baron, Y. et al. Detection of single W-centers in silicon. ACS Photonics 9, 2337–2345 (2022).

[2] Johnston, A. et al. Cavity-coupled telecom atomic source in silicon. Nat. Commun. 15, 2350 (2024)

※ 용어 설명

\* 실리콘 T- 센터: 실리콘 격자 안에서 탄소(C)와 수소(H)가 포함된 복합 결함 구조

실리콘 G-센터: 실리콘 격자 안에서 실리콘 빈자리에 두 개의 탄소(C) 원자가 결합한 형태

실리콘 W-센터: 실리콘 격자 내의 세 개의 실리콘 자간 원자가 모여 형성한 삼원자 클러스터 결함 형태

## 5. 연구내용

### o 전체(1~2단계) 연구내용

#### ① 28Si전용 MBE 설계·제작·설치·운영

- 국내에 전례없는 고순도 Si MBE 설계·제작·설치·운영 know-how 확보
- 고순도의 내고온 Manipulator, chamber, 진공 펌프, 제어 장치, software 등 국산화 비율이 높은 장비 제작
- 안정적인 MBE 장비 설치 공간 확보 제시, 액체질소 라인 등 서비스 라인 설치 확보 계획 제시. 장비/시설 자동화 운영 방향 제시.
- MBE 운영 경력 10년 이상의 박사학위 소지자 최소 1인 이상 투입
- 1인 이상 별도 전문원 투입 통한 장비 안정 유지 제안 [권고]
- 안정적인 소재 공급망 연구자에게 제공 방안 제시 [제1세부외 국내·외 공동 연구자]

※ 28Si MBE 장비 운영 발전 방향 및 연구자 네트워크 확대 방향 제시

② 28Si 박막 성장

- 28Si 전용 소스 및 고순도 SiGe, Si 소스 운영 [28Si내 29Si동위원소 농도 100 ppm이하]
- 2 cm x 2 cm 초과하는 면적의 28Si on SOI 박막 성장 [두께 균일도  $\pm 1$  % 이내]

③ 28Si on Natural Si, 28Si on SOI 기술 개발 (1,2중 한 개 이상 필수 개발, 3의 개발은 선택사항)

1. Si 기판상 28Si 성장 기술 개발  
[예: 네덜란드 Qutech 구조, 100nm-28Si/1 $\mu$ m I-Si/Natural Si]
2. SOI 기판상 28Si 박막 성장 기술 개발  
[예: 프랑스 LETI 구조, 60nm-28Si/145nm-SiO<sub>2</sub>/Si기판]
3. Si 기판상 SiGe/28Si 구조 성장기술 개발 [선택사항]

④ 28Si상 센터 구조 개발

- Ion implanter를 활용한 이온 주입 및 열처리 방법, parametric C doping 농도 제어 방법 연구
- 세부1의 협력 연구자와 저밀도 양자점 추적, 광학구조 설계/제작, 광자 순수도 및 HOM 측정 연구, 그리고 핵스핀 활용에 대한 공동 연구 수행함. T-센터 개발은 필수이며, G, G\*, W-센터 등 광섬유통신 대역의 결합센터 개발을 권고
- T-센터 기반 28Si 기판 제작 기술의 산업화 및 기업을 통한 28Si 산업화 시작

## 6. 기대 효과

- 실리콘 포토닉스로 구현되는 광기반 양자컴퓨팅과 28Si 호스트는 동일한 실리콘 기판에 기반을 활용할 수 있음. 또한 28Si은 spin qubit 구현이 가능한 핵심 소재임. 즉, CMOS 호환 Si 소재를 활용하여, 양자통신, 센싱, 양자컴퓨팅용 다수 qubit의 대량이 생산 가능함. 특히 우리나라의 강점인 나노 CMOS 공정을 적용할 수 있음. 본 소재 개발에 성공한다면 산업적 강점을 가진 분야를 양자 기술에 적극 활용이 가능함
- 대량 생산, 소형화 및 집적화에 유리한 Si 반도체 기반의 양자 중계기 기술을 확보하여 양자정보 기술 산업화 가속화 함

## 7. 지원기간/예산/추진체계

○ 연구개발기간 : 5년 이내

○ 정부지원연구개발비 : '25년 4.18억원 이내

- 1~2단계까지 총 정부지원연구개발비 32.77억원 이내

※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가  
적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/  
변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  |     | 기간             | 개월수  | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월  | 418백만원    |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월  | 786백만원    |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월 | 691백만원    |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월 | 691백만원    |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월 | 691백만원    |
| 합계  |     | -              | 51개월 | 3,277백만원  |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

○ 주관기관 : 제한없음

- 1단계부터 산업계 참여 권고, (2단계~) 산업계 참여 필수

\* 2단계부터 산업계 참여가 필수이나 연구개발 수행 중에 포함하는 것을 허용, 다만 이 경우는 산업계  
참여 계획을 반드시 포함하여 제시할 것(참여형태 : 주관/공동/위탁연구개발기관)

|               |  |          |                   |
|---------------|--|----------|-------------------|
| 연구유형          | 기초연구 (    ), 응용연구 ( ○ ), 개발연구 (    )   |          | TRL ( 3 )~( 5 )단계 |
| 과제특징          | 경쟁형(    ), 경쟁형(챌린지)(    ), SW자산뱅크등록(    ), 공개SW(    ), 기술료비징수(    ),<br>국제협력R&D(    ), 정책지정(    ), 혁신도약형(○), 표준화연계(    ), 사회문제해결형(    ),<br>일자리연계(    ), 소재부품장비(    ), 규제샌드박스(    ), 연구데이터공개(    ), 사업화연계(    ),<br>IP-R&D연계(    ) |          |                   |
| 구분            |  | 기술분야명/팀명 | 성명                |
| 책임PM(과제기획위원장) |  | 양자 PM    | 오윤제               |
| 담당 팀장         |  | 양자기술·산업팀 | 이민경               |

|             |   |         |
|-------------|---|---------|
| 관리번호        | 2025-양자통신-4   | (지정공모형) |
| 기술분류        | 대분류(양자)-중분류(양자통신)-소분류(양자네트워크)-세분류(양자중계기)  |         |
| 중점분야        | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( )   |         |
| 기획유형        | 파괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )  |         |
| 과제명         | 중성원자 기반 양자 중계기 원천기술 개발  |         |
| 1. 개요       | <p>○ 양자 중계기는 양자 신호 전송 방식에서 나타나는 거리 대비 전송률의 지수적 감소로 인한 전송 거리 한계를 개선하여 다항적으로 감소할 수 있음을 이론적으로 증명함</p> <p>○ 양자 중계기 기술은 여러 다양한 플랫폼에서 연구되고 있으며 다수의 양자 메모리 노드 간 장거리 양자 얽힘을 완전하게 구현한 실증 사례는 아직 없음</p> <p>○ 중성원자 기반으로 양자 중계기를 구현하려는 시도는 강결합 Cavity QED 시스템에서 결정론적 얽힘 생성 가능하며 높은 광자 포집 효율과 얽힘 충실도를 기대할 수 있음</p> <p>○ 중성원자 양자 메모리는 충돌 등에 의한 탈코히런스가 억제되며, dynamical decoupling 기법을 통해 수십 ms 수준의 장기 양자 메모리 시간 확보 가능함</p> <p>○ 중성원자 기반 양자 중계기를 이용하여 Cavity QED 시스템 내의 스핀 큐비트와 광자를 이용하고 장거리 광자 전송을 통한 장거리 양자 얽힘 형성</p> <div data-bbox="221 1456 1366 1756" data-label="Diagram"> </div> <p style="text-align: center;">&lt; 중성원자 양자 중계기 개념도 &gt;</p> |         |
| 2. 현황 및 필요성 | <p>○ (기존 기술현황)</p>  |         |

- 양자중계기 개발을 위한 연구는 현재 전 세계적으로 주요 연구기관들 간의 경쟁적인 노력이 진행 중이며 핵심 요소 기술로는 광자-양자 얽힘 생성, 양자 메모리, 벨상태 측정, 얽힘 스와핑, 얽힘 정제 등이 필요하며 이들 각각은 실험적으로 개별 보고된 바 있음
- 중성원자 기반 플랫폼에서는 독일 G. Rempe 그룹이 Alice-Bob 노드 사이의 단대단 양자 노드를 구현하고, 양자키분배(QKD)에서 거리 대비 전송률의 스케일링을 두 배 향상시켰음을 입증하였음. 하지만 절대적인 전송률에서 직접 전송을 증가하지 못하였고, 3노드를 구현하지 못했기 때문에, 양자 메모리-양자 메모리 간의 양자 정보 전송 및 양자 얽힘 정제와 같은 양자중계기 프로토콜의 필수 기능들을 시연하지 못함 (Phys. Rev. Lett. 126, 230506).

#### ○ (필요성)

- 중성원자 기반 양자중계기는 잘 포획된 중성원자는 긴 메모리 시간을 가질 수 있으며 중성원자와 캐비티 사이의 강결합 조건을 달성하면, 이론적으로 빠른 반복속도, 높은 충실도, 높은 효율로 광자-양자 얽힘을 구현할 수 있으므로 여러 양자 중계기 플랫폼 중 하나의 대안 기술로 개발할 필요가 있음
- 미국, EU, 중국 등 주요 양자 선도국과의 기술 격차를 좁히고, 양자 인터넷 인프라 자립 및 양자 주권 확보를 위한 전략적 기반 마련을 위해 개발이 필요함
- 중성원자 기반 양자 중계기 기술은 트위저 어레이 기반의 정밀 원자 제어, 고효율 단일광자 검출기 개발 및 통신 파장 변환 기술 확보는 각각 첨단 광학 시스템, 극저온 장비, 고정밀 나노광학 부품 등의 복합적 인프라를 요구하므로 단일 기관의 자체 기술만으로는 추진이 어려우며, 국가 차원의 전략적 투자와 정책적 지원이 필요함

### 3. 수요분석

○ (주요 수요처) 본 과제를 통해 개발되는 중장거리 양자 통신 기술은 정부·공공 기관, 통신 및 IT 산업계, 방위산업 및 우주항공 분야 등 다양한 수요처에 걸쳐 파급력이 예상됨. 주요 수요처 및 이해관계자는 다음과 같음.

- 정부/공공기관 : 국가 안보 및 국방을 위한 정보이론적으로 안전한 양자암호통신 기술 확보
- 통신사/IT 기업 : 기존 양자키분배(QKD) 기술의 속도-거리 트레이드오프 한계를 극복하는 장거리 양자 통신 서비스 개발, 양자 인터넷 구축 및 관련 서비스 개발을 위한 인프라 확보
- 연구기관/대학 : 양자 과학기술 인프라 확장 및 핵심 인력 양성.

#### ○ (협력방안)

- 정부/공공기관과의 협력방안
  - 국가안보 및 국방 분야의 수요기관과 협력하여 정보이론적 보안 수준의 양자암호 통신 기술을 실증 적용함
  - 국가 양자인터넷 로드맵과 연계하여 양자중계기 기반 장거리 양자 통신 실증 노드 구축 사업에 기술 적용을 추진함
  - 국방 및 재난 통신 인프라와의 연계 실증을 통해 고위험·고신뢰 환경에서의 기술 적합성 검증을 수행함
- 통신사/IT 기업과의 협력방안
  - 주요 통신사업자 및 양자암호통신 관련 장비업체와 협력하여, 기존 QKD 인프라를 기반으로 한 장거리 양자중계기 실증 플랫폼을 공동 구축할 수 있음
- 연구기관/대학과의 협력방안
  - 국내 주요 연구기관 및 대학과 공동연구를 수행하여, 3노드 100km 양자 중계기 실증을 위한 분산형 연구거점 구축을 추진할 수 있음
  - 양자 과학기술 핵심 인력 양성 프로그램과 연계하여, 대학과의 공동 교육·실습 체계를 마련하고 장비 공동 활용 기반의 개방형 실증 인프라를 확충 가능함

#### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
- 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원

#### ○ 최종목표(3단계) : 중성원자 기반 양자중계기 및 3 노드, 100 km 얽힘 양자 네트워크 기술 개발

- 중성원자 양자 중계기 기반 3노드, 100km 얽힘 전송 및 네트워크 기술
- 양자중계기를 매개한 원거리 중성원자 얽힘 생성률 : 0.1 Hz 이상
- 중성원자 양자 메모리 저장 시간 : 20 ms 이상

#### ○ 2단계 목표 : 중성원자 기반 양자메모리, 2노드 양자 중계기 원격 얽힘 생성 기술 개발

- 중성원자 양자 메모리 저장 시간 : 1 ms 이상
- 중성원자 양자 메모리 벨상태 측정 충실도 : 80% 이상

#### ○ 단계별 목표

| 구분             | 단계별 연구목표  |
|----------------|---|
| 1단계<br>(25~27) | 중성원자 양자 메모리 및 양자중계기용 중성원자-공진기 시스템 개발  |
| 2단계<br>(28~29) | 중성원자 양자 메모리 구현, 광자-중성원자 얽힘 생성, 벨 상태 측정, 양자 얽힘 스와핑 기능 구현, 통신대역 주파수변환 기능 구현, 2 노드 얽힘 구현 |
| 3단계<br>(30~32) | 중성원자 기반 3 노드 100 km 양자 중계기 실증   |

#### ○ 정량적 연구개발목표

| 성능지표 |                               | 단위 | 연구개발 목표치       |                |                | 연구개발 전<br>국내 수준 | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관)                    |
|------|-------------------------------|----|----------------|----------------|----------------|-----------------|--|
|      |                               |    | 1단계<br>(25~27) | 2단계<br>(28~29) | 3단계<br>(30~32) |                 |  |
| 1    | 중성원자 양자 메모리 저장<br>시간          | ms | 0.5            | 1              | 20             | -               | 20<br>(독일/막스플랑크<br>연구소), 1노드<br>수치임      |
| 2    | 모듈 내 2-큐비트 얽힘<br>게이트 충실도      | %  | -              | 80             | 97             | -               | 97.5<br>(미국/하버드 대학교),<br>1 node 수치임      |
| 3    | 중성원자-광자 얽힘 충실도                | %  | 70             | 75             | 85             | -               | 86.6 %<br>(독일/막스플랑크<br>연구소)<br>1 node 수치 |
| 4    | 중성원자-중성원자 원격<br>얽힘 생성률        | Hz | -              | 20             | 100            | -               | 1/85<br>(독일/뮌헨대학교),<br>2노드 33km에서<br>수치임 |
| 5    | 원격 얽힘 노드 수                    | -  | -              | 2              | 3              | -               | 2<br>(독일/뮌헨대학교)                          |
| 6    | 양자중계기를 매개한 원거리<br>중성원자 얽힘 생성률 | Hz | -              | -              | 0.1            | -               | 없음                                       |
| 7    | 전송 거리                         | km | -              | -              | 100            | -               | 33km<br>(독일/뮌헨대학교,<br>2노드)               |

#### 5. 연구내용

○ 전체(1~3단계) 연구내용 : 중성원자 양자중계기 기반 3 node, 100 km 양자중계기 실증

##### 1) 양자 메모리 구현

- 단일 중성원자를 기반으로 20 ms 이상의 코히런스 유지 시간을 확보하는 고충실도 양자 메모리 시스템을 구현
- 트위저 어레이 기반의 중성원자 포획, 상태 초기화, 및 다중 양자 상태 조작 기술 개발

##### 2) 광자-물질 얽힘 생성

- 캐비티 QED 시스템에서 vacuum-stimulated Raman adiabatic passage (VSTIRAP) 기법으로 결정론적 얽힘 생성 메커니즘을 구현.

### 3) 양자 얽힘 스와핑

- 두 개의 중성원자 양자 메모리 간 벨 상태 측정을 통해 얽힘 스와핑.
- 공통 캐비티 모드 기반의 광자 구별 불가능성을 활용하여 벨 상태 측정 성공 5% 이상

### 4) 양자 얽힘 정제

- 양자 얽힘 스와핑의 반복 시도 기반 프로토콜을 적용하여 양자얽힘 충실도 향상기술 개발

### 5) 통신대역 주파수 변환

- 중성원자가 방출하는 광자를 비선형 광학 결정을 사용해 통신 대역 주파수 (C-band, 1550 nm) 로의 변환을 구현.
- 고정밀 온도 안정화 및 위상 일치 조건을 갖춘 주파수 변환 모듈을 구현하여 50 % 이상의 주파수 변환 효율 기술 개발

### 6) 얽힘 발생 최적화 및 실험 시퀀스 이론 연구

- 원자-광자 및 원거리 원자 사이의 얽힘 발생을 위한 레이저 펄스 최적화 및 실험 시퀀스 확보 및 테스트 필요

### 7) 중성원자 양자중계기 기반 3 node, 100 km 양자중계기 실증

- 상기 요소 기술을 통합하여, 중성원자 기반 양자 메모리 3개 노드 간 얽힘 분배, 저장, 스와핑을 실시간으로 수행하는 100 km 양자 링크 구축을 실증
- 각 노드는 독립된 실험 구간으로 구성되며, 광섬유 기반 통신 채널(C-band)을 활용하여 장거리 양자 통신 조건을 구현함
- 복수 노드 간 절대 전송률 우위 확보 및 정제 기능 통합을 목표
- 중성 원자 얽힘 정제 및 얽힘 충실도 개선 기술 개발

## o 1~2단계까지 연구내용 : 중성원자 양자 중계기 요소 기술 개발

### 1) 양자 메모리 구현

- 단일 중성원자를 기반으로 1 ms 이상의 코히런스 유지 시간을 확보하는 고충실도 양자 메모리 시스템을 구현
- 트위저 어레이 기반의 중성원자 포획, 상태 초기화, 및 다중 양자 상태 조작 기술을 개발.

### 2) 광자-원자 얽힘 생성

- 캐비티 QED 시스템에서 vacuum-stimulated Raman adiabatic passage (VSTIRAP) 기법으로 결정론적 얽힘 생성 메커니즘을 구현

### 3) 양자 얽힘 스와핑

- 두 개의 중성원자 양자 메모리 간 벨 상태 측정을 통해 얽힘 스와핑
- 공통 캐비티 모드 기반의 광자 구별 불가능성을 활용하여 벨 상태 측정 성공률 5% 이상



#### 4) 양자 얽힘 정제

- 양자 얽힘 스와핑의 반복 시도 기반 프로토콜을 적용하여 양자얽힘 충실도 향상을 실현

#### 5) 통신대역 주파수 변환

- 중성원자가 방출하는 광자를 비선형 광학 결정을 사용해 통신 대역 주파수 (C-band, 1550 nm)로의 변환을 구현.
- 고정밀 온도 안정화 및 위상 일치 조건을 갖춘 주파수 변환 모듈을 구현하여 50 % 이상의 변환 효율 기술 개발

#### 6) 얽힘 발생 최적화 및 실험 시퀀스 이론 연구

- 원자-광자 및 원거리 원자 사이의 얽힘 발생을 위한 레이저 펄스 최적화 및 실험 시퀀스 확보 및 테스트

### 6. 기대 효과

#### ○ 교육 및 인력 양성 측면의 효과

- 중성원자 기반 양자 기술은 고난도 양자광학, 정밀 제어, 나노 광학 기술이 융합된 분야로, 본 과제를 통해 양자 과학기술 분야의 고급 인력 양성 기반이 마련됨.
- 공동연구 및 실증을 수행하는 과정에서 대학 및 연구기관과의 협력적 인력 양성 체계가 정착되며, 이는 양자 네트워크 시대를 선도할 차세대 전문 인력 확보로 이어질 수 있음

#### ○ 통신 미래기술 측면의 효과

- 본 과제를 통해 확보된 양자 중계기 기술은 기존 QKD의 거리 한계를 극복하고, 1000 km 이상 장거리에서도 안정적인 양자 통신을 실현할 수 있는 기반이 됨
- 중계기 기반 양자 링크는 양자 인터넷 및 분산형 양자컴퓨팅 네트워크의 물리적 인프라로 확장 가능성을 가지며, 국제 간 양자통신 연계 기술의 핵심 기술로 발전할 수 있음

#### ○ 사업성 및 산업 파급효과

- 주요 통신사업자 및 보안기술 기업과의 협력을 통해 중계기 기반 양자 통신 장비의 모듈화 및 상용화 가능성이 확보됨.
- 국가 통신 인프라, 국방·항공·우주 분야의 전술통신 보안 강화, 위성 양자통신 연계 실증 등 전략 산업 분야로의 기술 이전 및 응용이 가능함

#### ○ 공공 및 안보 측면의 기대효과

- 정보이론적으로 안전한 통신이 요구되는 국가 안보, 국방, 재난 대응 통신 인프라에 직접적으로 활용될 수 있으며, 양자암호 기반 사이버안보 체계 구축에 기여함
- 정부 주도의 양자 인터넷 로드맵 및 국가 전략기술 확보 정책과 연계되어 국가적 기술 주권 확보 및 기술 자립의 중추적 역할을 수행 가능함

## 7. 지원기간/예산/추진체계

○ 연구개발기간 : 8년 이내

○ 정부지원연구개발비 : '25년 8.7억원 이내

- 1~2단계까지 정부지원연구개발비 71.97억원 이내

- 3단계까지 총 정부지원연구개발비 128.25억원 이내

※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  | 기간  | 개월수            | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월       |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월       |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월      |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월      |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월      |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월      |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월      |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월      |
| 합계  | -   | 87개월           | 12,825백만원 |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

○ 주관기관 : 제한없음

- 1~2단계 산업계 참여 권고, (3단계~) 산업계 참여 필수

\* 3단계 산업계 참여 계획을 반드시 포함하여 제시할 것(참여형태 : 주관/공동/위탁연구개발기관)

|               |  |                   |
|---------------|--|-------------------|
| 연구유형          | 기초연구 ( ), 응용연구 ( ○ ), 개발연구 ( )   | TRL ( 3 )~( 5 )단계 |
| 과제특징          | 경쟁형( ), 경쟁형(챌린지)( ), SW자산뱅크등록( ), 공개SW( ), 기술료비징수( ), 국제협력R&D( ), 정책지정( ), 혁신도약형(○), 표준화연계( ), 사회문제해결형( ), 일자리연계( ), 소재부품장비( ), 규제샌드박스( ), 연구데이터공개( ), 사업화연계( ), IP-R&D연계( ) |                   |
| 구분            | 기술분야명/팀명   | 성명                |
| 책임PM(과제기획위원장) | 양자 PM  | 오윤제               |
| 담당 팀장         | 양자기술·산업팀   | 이민경               |

|      |   |         |
|------|---|---------|
| 관리번호 | 2025-양자통신-5   | (지정공모형) |
| 기술분류 | 대분류(양자)-중분류(양자통신)-소분류(양자네트워크)-세분류(양자키분배네트워크)        |         |
| 중점분야 | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( ) |         |
| 기획유형 | 파괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )      |         |
| 과제명  | 확정적 얽힘 고체 양자 중계기 원천기술 개발                            |         |

## 1. 개요

- 확장성이 뛰어난 고체 양자 중계기 플랫폼 중, 메모리 큐비트(스핀 등)와 광자 큐비트(단일 광자)의 확정적 상호작용이 가능한 플랫폼을 개발
- 개발된 양자 중계기 플랫폼을 활용하여 얽힘 교환 및 정제 기능을 수행하고, 수천-수만 큐비트 시스템으로의 확장 가능성을 증명

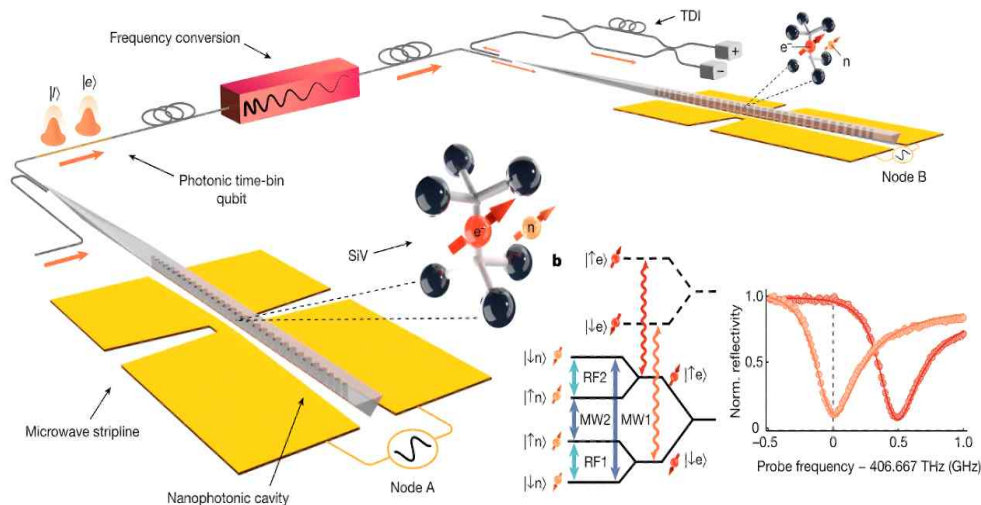


그림 미국 하버드 그룹 및 스피노프 기업 Lightsynq에서 발표한 35km 급 양자 중계기 시스템. 협력도 (cooperativity) 가 매우 높은 cQED (cavity QED) 시스템을 활용하였음. 단순 cQED를 넘어, 수백 ms 급 양자 메모리 기능을 가진 핵스핀을 동시에 활용하고 있음

## 2. 현황 및 필요성

- (기존 기술현황)
  - 다이아몬드 NV 센터 및 이온 트랩 등에서 보여지는 기존 양자 중계기 시스템의 경우, 메모리 및 광자 큐비트 간의 얽힘은 오래 전부터 구현되어 왔으나, 확정적 동작이 구현되지 않아 확장성에 대한 의문이 해결되지 않은 상황에 있음. 일부 공진기 결합형 양자점은 확정적 광자 추출은 희망적이나 메모리 큐비트 성능이 경쟁기술 대비 열악하며, 공진기 결합형 중성원자 기술의 경우 단위 소자의 메모리

및 광큐비트 성능은 모두 우수하나 폼팩터 및 이로 인한 확장성이 도전받고 있음

○ (필요성)

- 다이아몬드 SiV 센터로 대표되는 다이아몬드 4족 (group IV) 컬러센터의 경우, 고체형일 뿐 아니라 우수한 메모리 큐비트 성능, 전자-핵스핀 간 2큐비트 게이트 구현, 확정적 광자-전자 스핀 상호 작용이 모두 가능한 세계 정상급 플랫폼이므로 국내 연구개발이 시급함. 향후 양자 중계기의 표준으로 성장할 가능성이 매우 높아 정부 지원이 절실함. 또한 글로벌 양자 중계기 시장 선점을 위해, 경쟁 방식에 앞선 연구개발 성과의 국제표준화 병행이 필요함

### 3. 수요분석

○ (주요 수요처)

- 대외비를 많이 다루는 정부 기관, 군사 기밀을 다루는 군, 개인 의료 정보를 다루는 대형 병원, 민감한 금융정보를 다루는 은행 등이 장거리 양자 통신의 주요 수요 및 수혜 기관이 될 것으로 예상됨.

○ (협력방안)

- 금융권 등 양자 통신의 직접적인 수혜기관과 협력하여 각 도시에 위치한 지점 간 수백 km 수준 양자 통신 실환경 검증

### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
- 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원

- **최종목표(3단계) : 광공진기가 적용된 다이아몬드 4족 컬러센터 기반 확정적 얽힘 동작 양자 중계기 개발 및 3노드, 100km 중계기 프로토콜 수행**
  - cQED 시스템 기술 : 광공진기와 다이아몬드 컬러센터가 결합된 형태의 cavity QED (cQED) 시스템 기술, 500 이상의 높은 협력도(cooperativity)
  - cQED 제어 기술 : 고성능 소자 공정 및 다차원 파장 튜닝 기술 개발
  - 핵스핀 활용 2-큐비트 게이트 기술: 전자 스핀 - 핵스핀 2 큐비트 게이트에 기반, 우수한 메모리 시간의 핵스핀을 활용해 양자 중계기용 양자 메모리로 활용 기술

- 양방향 양자 주파수 변환 기술 : 컬러센터의 가시광을 텔레콤 대역으로 변환과 텔레콤 대역에서 가시광 대역으로 변환하는 양자 주파수 변환 (QFC, quantum frequency conversion) 기술
- cQED 입력용 단일광자 광원 기술 : 스핀 상태 기반 단일광자 통과/반사에 활용되는 단일광자 소스 제작. 이는 스핀-광자 상호작용이 극대화된 cQED 시스템과 별개로, cQED 동작 스펙트럼에 최대한 정렬된 단일 광자 광원 제작 기술
- 실환경 검증 : 3노드 / 100km 환경에서 양자 중계기 기능을 수행하고, 직접 전송 (direct transmission) 대비 속도 향상 및 실환경 검증 기술 개발
- 표준화 : 다이아몬드 cQED 시스템 기반 양자 중계기 원격 얽힘 및 정제 프로토콜의 국제 표준화

○ 2단계 목표 : 컬러센터 및 공진기 공정 불균질성을 해결할 수 있는 cQED 소자 기술 확보

- cQED 시스템 기술 : 광공진기와 다이아몬드 컬러센터가 결합된 형태의 cavity QED (cQED) 시스템 기술, 100 이상의 높은 협력도(cooperativity)
- cQED 제어 기술 : 고성능 소자 공정 및 다차원 파장 튜닝 기술 개발
- 양방향 양자 주파수 변환 기술 : 컬러센터의 가시광을 텔레콤 대역으로 변환과 텔레콤 대역에서 가시광 대역으로 변환하는 양자 주파수 변환 (QFC, quantum frequency conversion) 기술
- 표준화 : 다이아몬드 cQED 시스템 기반 양자 중계기 구조 등 국제표준화

○ 단계별 목표

| 구분  | 단계별 연구목표   |
|-----|--|
| 1단계 | cQED 시스템 제작을 위한 컬러 센터 및 광공진기 기술 확보   |
| 2단계 | 제어(튜닝) 기능이 구비된 다수의 cQED 시스템 제작 및 높은 협력도 구현<br>cQED 기반 양자 중계기 구조 및 기술 요구사항 국제표준 (De Jure SDO)                     |
| 3단계 | 제어 기능을 완비하여 10-100개 규모의 cQED 소자 중 임의의 복수 시스템 간 3노드 / 100km 급 실험 검증<br>cQED 기반 원격 얽힘 및 정제 프로토콜 국제표준 (De Jure SDO) |

○ 정량적 연구개발목표

| 성능지표 |   | 단위 | 연구개발 목표치       |                |                | 연구개발 전<br>국내 수준 | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관)   |
|------|---|----|----------------|----------------|----------------|-----------------|-------------------------|
|      |   |    | 1단계<br>(25~27) | 2단계<br>(28~29) | 3단계<br>(30~32) |                 |                         |
| 1    | cQED cooperativity <sup>1)</sup>          | -  | -              | 100            | 500            | -               | 100<br>(미국/Lightsynq)   |
| 2    | 원격 얽힘 적용 가능한<br>cQED 소자 수율 <sup>2)</sup>  | %  | -              | 40             | 60             | -               | 없음                      |
| 3    | 원격 얽힘 노드 수                                | -  | -              | 2              | 3              | -               | 2<br>(미국/하버드 대학교)       |
| 4    | 0.1K 환경 스핀 - 광자<br>벨상태 충실도 (fidelity)     | -  | -              | -              | 0.9            |                 | <0.87<br>(미국/Lightsynq) |
| 5    | 0.1K 환경 전자 스핀 결맞음<br>시간 (T <sub>2</sub> ) | ms | -              | -              | 0.3            |                 | 0.3<br>(미국/Harvard)     |
| 6    | 전송 거리                                     | km | -              | -              | 100            |                 | 40<br>(미국/하버드대학교)       |
| 7    | De Jure급 국제표준                             | 권  | -              | 1              | 1              |                 | 없음                      |

\* 위의 성능목표 외에도 정량적 성능지표 자율제시

※ 전송되는 광자의 중심 파장, 선폭 및 공진된 공진기 파장, 선폭 등 다양한 자유도 중 다수 선택

1) 높은 수치가 무조건 좋은 것은 아니며, 광자 출력 효율 등 기타 성능치와 트레이드오프가 있으므로 실제 시스템을 고려하여 유연하게 적용

2) cQED 시스템은 광공진기와 공진 파장과 컬러센터의 단일광자 방출 파장을 독립적으로 다루어 정렬할 수 있거나, 이와 동등한 기능을 제공하는 고난이도 소자 제어 기술이 필요함. 다수의 cQED 소자를 만들었을 때, 최종적으로 원격 얽힘에 활용이 될 수 있는 소자의 수율을 의미

## 5. 연구내용

### o 전체(1~3단계) 연구내용

- ① 다이아몬드 4족 컬러센터 (SiV, SnV 등) 기반 cavity QED (cQED) 소자를 다수 제작하고, 이들을 동일성을 위한 제반 공정 및 튜닝 기술 개발
  - cQED 시스템 기술: 포토닉 크리스탈 나노빔 등 광공진기와 다이아몬드 컬러센터가 결합된 형태의 cavity QED (cQED) 시스템 제작. 협력도(cooperativity)를 500이상 수준으로 달성하고, 이를 활용하여 확정적 전자 스핀 - 광자 상호 작용 구현 기술
  - cQED 제어 기술: 소자 간 동일성을 위한 컬러 센터 파장 튜닝, 공진기 튜닝 기능을 동시에 확보 하거나 이를 대체하는 기능 구현. 이를 통해 최초 불균질성 (컬러센터 방출 스펙트럼, 광공진기 스펙트럼)을 극복하여, 20 - 100 여개의 cQED 중 임의의 2개를 선택하더라도 얽힘이 될 수 있는 제어 기술
  - 스핀 기반 반사/투과 조정 기능 등을 활용하여 스핀 - 광자 확정적 얽힘 상태 구현
  - 양방향 양자 주파수 변환 기술 : 컬러센터의 가시광(일반적으로 600-700nm 대역)을 텔레콤 대역(O 밴드, C 밴드)으로 변환하는 양자 주파수 변환 (QFC, quantum frequency conversion)과 텔레콤 대역에서 가시광 대역으로 쌍방향 변환하는 양자 주파수 변환 기술

## ② 양자 중계 기능 시연

- 100km, 3노드 실환경 얽힘 양자 네트워크 구현
- 단일 칩 위 다수의 cQED 구성 및 중계 기능 활용 (다중화 등)
- 핵 - 전자 스핀 상호 작용등을 활용하여 얽힘 정제 또는 오류 정정 기능 구현
- 국제표준 기반 cQED 시스템 얽힘/정제 프로토콜의 상용 광 네트워크 inter-operability 검증

## ③ 양자 중계기 기술 표준화

- cQED 기반 양자 중계기 architecture 및 functional requirements (얽힘 제어, 스핀-광자 인터페이스, QFC 등) ITU 국제표준화
- cQED 시스템 운용 원격 얽힘 생성/배분 및 정제 프로토콜 ITU 국제표준 제안 및 승인

### o 1~2단계까지 연구내용

## ① 다이아몬드 4족 컬러센터 (SiV, SnV 등) 기반 cavity QED (cQED) 소자를 다수 제작하고, 이들을 동일성을 위한 제반 공정 및 튜닝 기술 개발

- cQED 시스템 기술: 포토닉 크리스탈 나노빔 등 광공진기와 다이아몬드 컬러센터가 결합된 형태의 cavity QED (cQED) 시스템 제작. 협력도(cooperativity)를 100이상 수준으로 달성하고, 이를 활용하여 확정적 전자 스핀 - 광자 상호 작용 구현 기술
- cQED 제어 기술: 소자 간 동일성을 위한 컬러 센터 파장 튜닝, 공진기 튜닝 기능을 동시에 확보 하거나 이를 대체하는 기능 구현. 이를 통해 최초 불균질성 (컬러센터 방출 스펙트럼, 광공진기 스펙트럼)을 극복하여, 20 - 100 여개의 cQED 중 임의의 2개를 선택하더라도 얽힘이 될 수 있는 제어 기술
- 스핀 기반 반사/투과 조정 기능 등을 활용하여 스핀 - 광자 확정적 얽힘 상태 구현
- 양방향 양자 주파수 변환 기술 : 컬러센터의 가시광(일반적으로 600-700nm 대역)을 텔레콤 대역(O 밴드, C 밴드)으로 변환하는 양자 주파수 변환 (QFC, quantum frequency conversion)과 텔레콤 대역에서 가시광 대역으로 쌍방향 변환하는 양자 주파수 변환 기술

## ② 양자 중계기 기술 표준화

- 표준화 : 다이아몬드 cQED 시스템 기반 양자 중계기 구조 등 양자 중계 기능 고도화 프로토콜의 국제표준화

### 6. 기대 효과

- 다이아몬드 4족 컬러센터는 전세계 고체 기반 양자중계기의 핵심 연구진이 모두 뛰어난 뜨거운 분야일 뿐 아니라, 세계 최초 대기업 투자를 이끌어 낼 정도로 가장 실용성이 뛰어난 기술로 평가됨. 국내 연구진이 빠르게 추격하여 성공 시 양자 중계기 분야 표준 가능성이 높은 핵심 기술을 확보할 수 있을 것으로 기대

## 7. 지원기간/예산/추진체계

- 연구개발기간 : 8년 이내

- 정부지원연구개발비 : '25년 10.87억원 이내

- 1~2단계까지 정부지원연구개발비 89.96억원 이내

- 3단계까지 총 정부지원연구개발비 160.34억원 이내

※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  |     | 기간             | 개월수  | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월  | 1,087백만원  |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월  | 2,044백만원  |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월 | 1,955백만원  |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월 | 1,955백만원  |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월 | 1,955백만원  |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월 | 2,346백만원  |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월 | 2,346백만원  |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월 | 2,346백만원  |
| 합계  |     | -              | 87개월 | 16,034백만원 |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

- 주관기관 : 제한없음

- 1~2단계 산업계 참여 권고, (3단계~) 산업계 참여 필수

\* 3단계 산업계 참여 계획을 반드시 포함하여 제시할 것(참여형태 : 주관/공동/위탁연구개발기관)

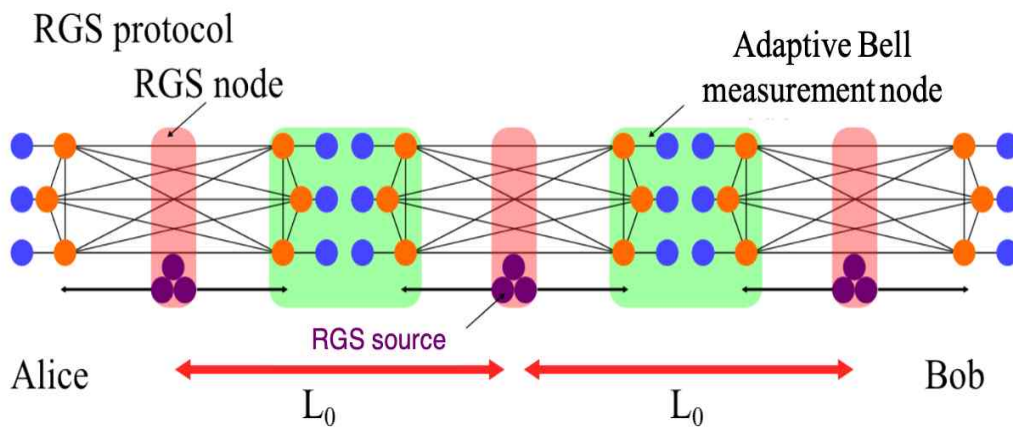
|      |   |          |                   |
|------|---|----------|-------------------|
| 연구유형 | 기초연구 (    ), 응용연구 (    ○    ), 개발연구 (    )  |          | TRL ( 3 )~( 5 )단계 |
| 과제특징 | 경쟁형(    ), 경쟁형(챌린지)(    ), SW자산뱅크등록(    ), 공개SW(    ), 기술료비징수(    ),<br>국제협력R&D(    ), 정책지정(    ), 혁신도약형(○), 표준화연계(○), 사회문제해결형(    ),<br>일자리연계(    ), 소재부품장비(    ), 규제샌드박스(    ), 연구데이터공개(    ), 사업화연계(    ),<br>IP-R&D연계(    ) |          |                   |
|      | 구분  | 기술분야명/팀명 | 성명                |
|      | 책임PM(과제기획위원장)   | 양자 PM    | 오윤제               |
|      | 담당 팀장   | 양자기술·산업팀 | 이민경               |



|      |   |         |
|------|---|---------|
| 관리번호 | 2025-양자통신-6   | (지정공모형) |
| 기술분류 | 대분류(양자)-중분류(양자통신)-소분류(양자네트워크)-세분류(양자키분배네트워크)        |         |
| 중점분야 | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( ) |         |
| 기획유형 | 과파적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D(√)        |         |
| 과제명  | 얽힘 다광자 기반 일방향 고속 양자 중계기 원천기술 개발                     |         |

## 1. 개요

- 전자 및 핵스핀 등 양자 메모리 없이 광자에 인코딩된 양자 정보만을 활용하는 양자 중계기 — 얽힘 다광자 양자중계기 (all-photonic quantum repeater) — 제작 및 구동 기술
- 시스템 구성에 소요되는 막대한 자원을 지원하기 위해 일체형 보드 피드포워드 시스템 제작, 확정적 선형 클러스터 상태 출력 양자광원, 자원 최적화 및 시스템 구동 운용 프로토콜 개발



※ 그림 얽힘 다광자 양자 중계기 (all-photonic quantum repeater) 개념도. 중계기 그래프 스테이트 생성 노드 및 적응 측정 노드의 서로 다른 기능을 갖는 기지국이 교대로 배치됨. 양 끝단 노드 (end node)는 구체적 응용에 따라 메모리 큐비트가 불필요한 경우와 필수적인 경우가 모두 존재. RGS source 는 얽힘 광자 생성을 위한 물리계로 광인터페이스가 있는 전자 스핀을 포함할 수 있으나, 그 용도가 일반적인 예고 얽힘 (heralded entanglement)에서 쓰이는 양자 메모리 기능이 아님에 주의

## 2. 현황 및 필요성

- (기존 기술현황)
  - 과거 대부분의 유선 양자 중계기는 비행 큐비트(flying qubit)에 해당하는 광자와

전자/핵스핀 등 물리 큐비트 (physical qubit) 간 얽힘을 통한 양자 중계기 제작을 추구해 왔으나, 수천/수만 큐비트 수준의 확장성, kHz - MHz 수준의 고속 처리 능력, 99% 수준의 높은 큐비트 신뢰도를 동시에 확보하는 데 있어 많은 어려움이 수반됨

- 특히, 20년에 가까운 하드웨어 기술 개발에도 불구하고 1세대 양자 중계기 아키텍처인 예고 얽힘 (heralded entanglement) 방식에 머무르고 있으며, 이는 양방향 고전 통신을 수반하므로 중계기를 이용한 얽힘 배분 속도 향상에 근본적인 한계로 작용함
- 현재의 광학 장비에서 발생하는 측정 오류 등 양자 하드웨어 제어에서 존재하는 오류의 문제는 얽힘 생성 프로토콜의 한계점을 제시

#### ○ (필요성)

- 얽힘 다광자 양자중계기 (all-photonic quantum repeater) 는 2015년 첫 개념이 제시[2]된 기술로, 물리큐비트 형태의 양자 메모리를 전혀 사용하지 않는데다 양방향 통신이 필요하지 않은 3세대 중계기 기술로 분류되어, 개발 성공 시 현재 인터넷 망과 같이 일방향 광신호 흐름 및 처리로 속도가 결정되므로 실용성 높음
- 매우 많은 광자의 얽힘 구조인 중계기 그래프 상태 (RGS, repeater graph state) 제작을 위해서는 기지국당 백만개 전후의 단일광자 광원이 필요할 것으로 추산되는 등 막대한 얽힘 광자 상태 생성 자원이 소모될 것이므로 확장성 있는 하드웨어 기술 개발이 시급[3].
- 광집적회로(PIC, photonic integrated circuit) 및 반도체에 기반하는 일체 보드형 피드포워드 기술은 RGS 생성을 위한 퓨전-멀티플렉싱(RGS 노드)과 적응 벨 측정(BSM, Bell state measurement)[2,4]에 모두 쓰이는 핵심 하드웨어 기술로써 개발 시급
- 광자에 대한 측정 오류 등 잡음 문제들을 극복하여 최종적으로 잡음 없는 얽힘을 공유하기 위한 잡음 제어 프로토콜 및 얽힘 공유 프로토콜 개발이 필요

- [1] S. Muralidharan, L. Li, J. Kim, N. Lütkenhaus, M. D. Lukin, and L. Jiang, Optimal architectures for long distance quantum communication, Scientific Reports 6, 1 (2016).
- [2] K. Azuma, K. Tamaki, and H.-K. Lo, All-photonic quantum repeaters, Nat Commun 6, 1 (2015).
- [3] M. Pant, H. Krovi, D. Englund, and S. Guha, Rate-distance tradeoff and resource costs for all-optical quantum repeaters, Phys. Rev. A 95, 012304 (2017).
- [4] N. Benchasattabuse, M. Hajdušek, and R. Van Meter, Engineering Challenges in All-Photonic Quantum Repeaters, IEEE Network 39, 132 (2025).

### 3. 수요분석

- (주요 수요처) 대외비를 많이 다루는 정부 기관, 군사 기밀을 다루는 군, 개인 의료 정보를 다루는 대형 병원, 민감한 금융정보를 다루는 은행 등이 장거리 양자통신의

주요 수요 및 수혜 기관이 될 것으로 예상

- (협력방안) 금융권 등 양자 통신의 직접적인 수혜기관과 협력하여 각 도시에 위치한 지점 간 수백 km 수준 양자 통신 실환경 검증

#### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무방타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
- 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원

#### ○ 최종목표(3단계) : 모듈형 피드포워드 기반 BSM 노드 및 RGS 생성 노드 제작, 실환경 3노드 100km RGS 프로토콜 수행

- 모듈형 피드포워드 시스템(예: PIC, 단일광자, 주문형 반도체, 초전도 나노선 단일 광자 검출기, 광마더보드 등이 접합된 형태)을 활용한 퓨전-멀티플렉싱 기반 얽힘 상태 확장, 적응 BSM, 양자 오류 정정(정제) 하드웨어 수행
- 그래프 얽힘 상태 검증, 측정 및 양자 오류 처리 기법 등 RGS 구성 및 운용을 위한 양자 정보 처리 프로토콜 개발
- 확정적 선형 양자광원 생성 부품 : 양자점 등을 활용한 10큐비트 이상 단일광자 선형 클러스터 상태에 Type-II 퓨전-멀티플렉싱을 적용하여 Tree state 등 RGS 생성
- 텔레콤 대역 광원: 양자점 등 양자 방사체를 확정적 얽힘 상태 생성 소스로 활용할 경우, 1) 광원 자체를 통신 파장으로 업그레이드 하거나, 2) 광자 순수도(purity)를 높게 유지시킬 뿐 아니라 양자 변환 효율이 매우 높은 양자 주파수 변환(QFC, quantum frequency conversion) 소자가 결합해야 함
- 3개 노드 및 종단 간 100km 환경에서 RGS 생성, 분배 및 적응 BSM 의 3단계 구현

#### ○ 2단계 목표 : 모듈형 피드포워드 기반 BSM 노드 및 RGS 생성 노드 제작, 노드별 RGS 기능 수행

- 10ns 이하 지연 (광검출 전기 신호 입력 후 PIC 광스위칭 완료 간격)을 갖는 일체형 피드포워드 시스템 제작
- Type II 퓨전-멀티플렉싱 및 BSM 기능 시연
- 광자 6개 이상의 선형 클러스터 상태 제작 및 이들의 Type-II 퓨전을 통한 Tree 상태 생성

## ○ 단계별 목표

| 구분  | 단계별 연구목표  |
|-----|---|
| 1단계 | - 20ns 급 모듈형 피드포워드 시스템 제작<br>- 선형 얽힘 광원을 피드포워드 시스템에 저손실 접합<br>- 선형 클러스터 양자 상태 검증 프로토콜 개발                                |
| 2단계 | - 10ns 급 시스템 제작 및 이를 활용한 퓨전-멀티플렉싱 및 적응 BSM 구현<br>- 선형 클러스터 상태를 퓨전-멀티플렉싱하여 RGS 소스로 변환<br>- RGS 검증 프로토콜 개발 및 얽힘 상태 설계 최적화 |
| 3단계 | - 3노드 100 km 양자 중계 성능 시연<br>- 양자 중계 프로토콜 실환경 적용   |

## ○ 정량적 연구개발목표

| 성능지표 |  | 단위 | 연구개발 목표치       |                |                | 연구개발 전<br>국내 수준 | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관)                  |
|------|--|----|----------------|----------------|----------------|-----------------|--|
|      |  |    | 1단계<br>(25~26) | 2단계<br>(27~29) | 3단계<br>(30~32) |                 |  |
| 1    | Type-II 퓨전 <sup>1)</sup> -멀티플렉서<br>예고 얽힘 상태 성공 확률                          | -  | -              | 80             | 99             | -               | - <sup>4)</sup>                        |
| 2    | 측정기반 양자 연산<br>피드포워드 시스템의 신호<br>처리 지연 시간 (광검출<br>신호 입력 - PIC 스위칭<br>완료 시간차) | ns | 20             | 10             | 5              | -               | 23<br>(독일/Paderborn) <sup>5)</sup>     |
| 3    | 도파로 집적형 SNSPD<br>측정 효율 <sup>2)</sup>                                       | %  | -              | 80             | 90             | -               | 88.9%<br>(미국/PsiQuantum) <sup>6)</sup> |
| 4    | 확정적으로 생성된 선형<br>클러스터 상태 광자 개수 <sup>3)</sup>                                | 개수 | 4              | 6              | 10<br>이상       | -               | - <sup>4)</sup>                        |
| 5    | 양자 중계 프로토콜이<br>허용가능한(tolerable) RGS<br>노드 - BSM 노드 간 최대<br>광자 손실율          | %  | 90             | 95             | 95             | -               | - <sup>4)</sup>                        |
| 6    | 전송 거리  | km | -              | -              | 100            | -               | 없음                                     |
| 7    | 원격 얽힘 노드 수   | -  | -              | -              | 3              | -               | 없음                                     |

\* 위의 성능목표 표 외에도 정량적 성능지표 자율제시

※ 세계 최고 성능치의 구현 조건은 본 RFP 및 실제 과제 수행 내용과 크게 다를 수 있으므로 참고 자료로만 활용

1) Type-II 퓨전이 아니더라도 이보다 진보된 강화 퓨전 (boosted fusion) 등을 사용할 수 있으나, 퓨전 후 얽힘 상태의 크기와 성공 확률이 동일한 수준이어야 함. 광손실 등을 제외한 이론적인 BSM 성공 확률 50%와 이들의 멀티플렉싱만을 고려한 조건

2) 단일칩 위 30개 이상 제작된 소자들의 평균값

3) 광섬유 끝단 출력 기준 1 kHz 이상 생성률

4) 도전적인 목표를 설정한 관계로 인해 현재 뚜렷한 레퍼런스 부재

5) F. Thiele et al., Cryogenic feedforward of a photonic quantum state, Optica, OPTICA 12, 720 (2025).

6) K. Alexander et al., A manufacturable platform for photonic quantum computing, Nature 641, 876 (2025).

## 5. 연구내용

### ○ 전체(1~3단계) 연구내용

- ① 모듈형 피드포워드 시스템과 선형 클러스터 양자광원을 기반으로 퓨전-멀티플렉싱 및 적응 BSM 수행
  - 광집적회로, 주문형 반도체 (Application Specific Integrated Circuits, ASIC), 초전도나노선단일광자 검출기 (Superconducting Nanowire Single-Photon Detector, SNSPD), 광마더보드, 광섬유 다발 입출력부가 결합된 시스템 제작
  - 집적형 SNSPD 제작 및 효율 증대, 타이밍 지터 특성 개선, 광자수 분해가 가능한 초전도 PNRD (photon number resolution detector) 제작 및 효율 증대, 분해 가능한 광자 수 증대
- ② 스핀-광자 인터페이스를 가진 확정적 양자광원을 이용하여 확정적 양자 광원 생성 및 피드포워드 시스템 퓨전-멀티플렉싱 적용
  - 10큐비트 이상 확정 출력 선형 클러스터 상태와 피드포워드 시스템을 결합하여, 18큐비트 이상 퓨전-멀티플렉싱 기능 수행
  - 양자 광원의 텔레콤 대역 활용을 위한 고성능 QFC 등 기술 적용
- ③ RGS 생성 및 양자 중계기 운용 프로토콜
  - 양자 얽힘 검증, 측정 오류 처리, 그래프 상태 구성, 양자 자원 구성 최적화 및 운용 프로토콜 등 각종 양자 정보 처리 기법 개발
  - 광자 손실 및 BSM 실패를 모두 처리할 수 있는 오류 정정 기능 실험 증명
- ④ RGS 생성 및 양자 중계기 운용 프로토콜
  - 3개 노드(RGS 생성 노드 2개, 측정 노드 1개) 및 종단 간 100km 환경에서 RGS 생성, 분배 및 적응 BSM 의 3단계 기본 기능 구현
  - 직접 전송 (direct transmission) 대비 속도 향상 정밀 측정 및 향후 하드웨어 성능 개선에 따른 로드맵 제작

#### o 1~2단계 연구내용

- ① 모듈형 피드포워드 시스템과 선형 클러스터 양자광원을 기반으로 퓨전-멀티플렉싱 및 적응 BSM 수행
  - 광집적회로, 주문형 반도체 (Application Specific Integrated Circuits, ASIC), 초전도나노선단일광자 검출기 (Superconducting Nanowire Single-Photon Detector, SNSPD), 광마더보드, 광섬유 다발 입출력부가 결합된 시스템 제작
  - 집적형 SNSPD 제작 및 효율 증대, 타이밍 지터 특성 개선, 광자수 분해가 가능한 초전도 PNRD (photon number resolution detector) 제작 및 효율 증대, 분해 가능한 광자 수 증대
- ② 스핀-광자 인터페이스를 가진 확정적 양자광원을 이용하여 확정적 양자 광원 생성 및 피드포워드 시스템 퓨전-멀티플렉싱 적용
  - 6큐비트 이상 확정 출력 선형 클러스터 상태와 피드포워드 시스템을 결합하여, 10 큐비트 퓨전-멀티플렉싱 기능 수행
- ③ RGS 생성 및 양자 중계기 운용 프로토콜

- 양자 얽힘 검증, 측정 오류 처리, 그래프 상태 구성, 양자 자원 구성 최적화 및 운용 프로토콜 등 각종 양자 정보 처리 기법 개발

## 6. 기대 효과

- 본 과제를 성공적으로 수행 시 양자 분야 전반에 커다란 파급효과를 가져올 모듈형 피드포워드, 그리고 이와 결합된 확정적 양자광원 시스템을 보유하게 됨
- 이러한 성과는 양자 기술 선도국 내에서도 현재 갖고 있지 않은 역량으로써, 동 시스템 운용 경험을 가진 세계적 수준의 양자 기술 전문가를 육성해 낼 것
- 본 과제 하드웨어 시스템의 요소 기술은 대부분 기존 고전 광 및 전자 소자들로서, 신뢰성이 매우 높아 기본 기능 데모를 바탕으로 실증·사업화가 빠르게 진행될 것으로 기대됨

## 7. 지원기간/예산/추진체계

- 연구개발기간 : 8년 이내
  - 정부지원연구개발비 : '25년 8.7억원 이내
    - 1~2단계까지 정부지원연구개발비 71.97억원 이내
    - 3단계까지 총 정부지원연구개발비 128.25억원 이내
- ※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  |     | 기간             | 개월수  | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월  | 870백만원    |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월  | 1,635백만원  |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월 | 1,564백만원  |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월 | 1,564백만원  |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월 | 1,564백만원  |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월 | 1,876백만원  |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월 | 1,876백만원  |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월 | 1,876백만원  |
| 합계  |     | -              | 87개월 | 12,825백만원 |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

- 주관기관 : 제한없음
  - 1~2단계 산업계 참여 권고, (3단계~) 산업계 참여 필수

|  |  |                 |
|--|--|-----------------|
| * 3단계 산업계 참여 계획을 반드시 포함하여 제시할 것(참여형태 : 주관/공동/위탁연구개발기관) |  |                 |
| 연구유형   | 기초연구 (    ), 응용연구 ( ○ ), 개발연구 (    )   | TRL (3) ~ (5)단계 |
| 과제특징   | 경쟁형(    ), 경쟁형(챌린지)(    ), SW자산뱅크등록(    ), 공개SW(    ), 기술료비징수(    ),<br>국제협력R&D(    ), 정책지정(    ), 혁신도약형(○), 표준화연계(    ), 사회문제해결형(    ),<br>일자리연계(    ), 소재부품장비(    ), 규제샌드박스(    ), 연구데이터공개(    ), 사업화연계(    ),<br>IP-R&D연계(    ) |                 |
|  | 구분   | 기술분야명/팀명        |
|  | 책임PM(과제기획위원장)  | 양자 PM           |
|  | 담당 팀장  | 양자기술·산업팀        |
|  |  | 성명              |
|  |  | 오윤제             |
|  |  | 이민경             |

|  |   |         |
|--|---|---------|
| 관리번호   | 2025-양자센싱-1   | (지정공모형) |
| 기술분류   | 대분류(양자)-중분류(양자센싱)-소분류(양자관성센싱)-세분류(양자가속도센싱, 양자회전센싱)  |         |
| 중점분야   | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( ) |         |
| 기획유형   | 파괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )      |         |
| 과제명  | 원자기반 항법용 양자 자이로 및 가속도 센서 개발                         |         |
| 1. 개요  |   |         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 원자의 간섭, 얽힘 등의 양자 특성을 활용하여 고정밀 회전속도 및 가속도 측정 센서 개발</li> <li>○ 기존 및 고전 센서의 감도 및 안정도를 뛰어넘는 고정밀 센서 개발</li> <li>○ 잠수함, 항공기, 선박 등에 탑재하여 운용을 위해 1~ 2 단계에서는 원자기반 양자 자이로 및 가속도 센서 핵심기술을 확보하고, 실험실 환경에서 동작을 구현함. 3 단계에서는 현장 이동 및 동적환경에서 동작 가능한 센서를 개발</li> <li>○ 하나의 시스템에서 가속도와 회전속도를 동시에 측정할 수 있는 시스템을 구현</li> </ul>   |   |         |
| 2. 현황 및 필요성  |   |         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (기존 기술현황) 기존의 고정밀 자이로와 가속도계은 성능 한계에 도달하여 앞으로 성능 개선이 거의 불가능할 것으로 예측되고 있으며, 원자기반의 양자 자이로 및 가속도계는 기존 기술의 한계를 뛰어넘는 성능을 보여주고 있음</li> <li>○ (필요성) 기존 관성센서의 한계를 뛰어넘는 고정밀 양자 자이로 및 가속도계 핵심 기술 개발 연구를 통하여 국방, 항공, 우주 등의 분야에서 무-위성 항법을 위한 양자 관성 센서 개발 및 국가 전략기술 확보가 필요함</li> <li>- 원자 기반의 양자자이로 및 가속도계는 아직 실험실 환경에서 개발 및 테스트가 진행중이지만, 기존 자이로 및 가속도계 대비 10 배 이상의 뛰어난 성능을 보여주고 있음</li> </ul> <p>(자이로 성능 비교)</p> |   |         |



| 성능 지표                     | 링 레이저 자이로  | 원자간섭계 기반 자이로   |
|---------------------------|--|--|
| 감도<br>(Angle Random Walk) | $(10^{-3} \sim 10^{-2}) \text{ }^{\circ}/\text{h}^{1/2}$ | $(10^{-1} \sim 10^{-5}) \text{ }^{\circ}/\text{h}^{1/2}$ |
| 장기안정도<br>(bias stability) | $(10^{-4} \sim 10^{-2}) \text{ }^{\circ}/\text{h}$       | $(10^{-1} \sim 10^{-5}) \text{ }^{\circ}/\text{h}$       |

(가속도계 성능 비교)

| 성능 지표                     | 기계식 가속도계  | 전기식 가속도계  | 원자 기반<br>양자가속도계                             |
|---------------------------|---|---|---|
| 감도 (Sensitivity)          | $(10 \sim 1000) \text{ } \mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$ | $(1 \sim 100) \text{ } \mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$ | $1 \text{ } \mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$ 이하 |
| 장기안정도<br>(bias stability) | $(10 \sim 100) \text{ } \mu\text{g}/\text{h}$         | $(10 \sim 100) \text{ } \mu\text{g}/\text{h}$       | $1 \text{ } \mu\text{g}/\text{h}$ 이하        |

- 양자 관성 센서 기술의 발전과 국제적인 동향을 고려할 때 국가 기술 안보를 위한 양자 관성 센서 기술 개발이 필요하며, 이를 위한 국가적인 지원이 절실함
- 미국의 경우 한 시스템에서 회전속도와 가속도를 동시 측정할 수 있는 양자 자이로 및 가속도센서를 항공기에 탑재하여 4시간 동안 성공적인 양자 관성 항법 즉, 무-위성 항법 시험을 보여주었으며, 유럽, 일본, 중국 등에서도 무위성 항법을 위한 양자 관성 센서 개발 연구를 적극적으로 수행하고 있음
- 최근, 각각의 고정밀 양자 자이로와 가속도 센서를 개발하려는 연구를 하기도 하지만, 미국의 시험 결과 발표 후 세계 각국은 두 물리량을 하나에 시스템에서 측정할 수 있고 빠른 시간내에 실제 적용 가능성이 높은 센서 개발을 시도하고 있음
- 국내에서도 핵심기술을 확보하고, 무-위성 항법에 적용하기 위한 양자 자이로 및 가속도 센서의 개발 연구가 필요함

### 3. 수요분석

- (주요 수요처) 고정밀 양자 자이로 및 가속도 센싱 기술은 전이나 위성 항법이 불가능한 환경에서 항법을 계속 유지 하기 위한 필수 기술임. 주요 수요처는 다음과 같음
  - (국방분야) 재밍 등으로 위성항법이 불가능한 전이나 위성신호가 도달하지 않는 해저의 잠수함 등에서 활용될 수 있음
  - (우주 항공 분야) 우주 환경에서는 위성 항법이 불가하므로, 위성 자세 제어, 경로 유지 등을 위해 관성항법이 필요하며, 이때 고정밀 관성 센서가 요구됨
  - (자율 주행 분야) 자동차, 선박, 항공기 등의 자율주행에 활용될 수 있음
- (협력방안) 국방 분야의 수요를 고려하여 국방 미래 기술로 채택될 수 있도록 하며, 관련 국방 분야와 협력함. 또한, 본 과제가 성공적으로 종료된 후에는 국방 분야에서 실용화를 위한 사업이 계속될 수 있도록 관련 기업 간 협력체계를 마련함

#### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
- 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원

#### ○ 최종목표 (3단계) : 원자기반 항법용 양자 자이로 및 가속도 센서 개발

- 원자기반의 한 개의 시스템에서 회전속도와 가속도를 동시에 측정할 수 있는 센서 개발
- 높은 반복률로 연속 측정이 가능하고, 항공기, 선박, 잠수함 등에 탑재가 가능한 크기와 동적 환경에서 동작 가능한 센서 기술 개발

#### ○ 2단계 목표 : 원자기반 양자 자이로 및 가속도 센서 개발

- 원자기반의 한 개의 시스템에서 회전속도와 가속도를 동시에 측정할 수 있는 센서 개발 (물리부 크기  $2\text{ m}^3$  이하, 레이저 및 제어 시스템 크기  $1.5\text{ m}^3$  이하)
- 회전속도 감도  $10^{-2}\text{ }^\circ/\text{h}^{1/2}$ , 가속도 측정 감도  $5\text{ }\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$  달성  
(정적 환경에서 성능 평가)

#### ○ 단계별 목표

| 구분               | 단계별 연구목표   |
|------------------|--|
| 1단계<br>(‘25~’27) | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 원자 기반 양자 자이로 및 가속도 센서 개념 설계</li> <li>○ 양자 자이로 및 가속도 센서 물리부 설계 제작</li> <li>○ 레이저 시스템 설계 및 제작                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 레이저 시스템 소형화 및 제어 시스템 제작</li> </ul> </li> </ul> |
| 2단계<br>(‘28~’29) | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 회전속도 측정, 감도 및 안정도 평가</li> <li>○ 가속도 측정, 감도 및 안정도 평가</li> <li>○ 회전속도 및 가속도 동시 측정 및 최적화</li> </ul>  |
| 3단계<br>(‘30~’32) | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 이동 및 동적 환경 동작을 위한 물리부 설계 제작</li> <li>○ 온도 등 환경 변화에 강한 레이저 시스템 제작 및 소형화</li> <li>○ 회전속도 및 가속도 측정 및 동적 환경에서 동작 확인</li> <li>○ 회전속도 및 가속도 측정의 감도와 안정도 평가</li> <li>○ 동적 환경에서의 동작 최적화</li> </ul>                      |

#### ○ 정량적 연구개발목표

| 성능지표 |                                    | 단위                                | 연구개발 목표치       |                  |                  | 연구개발 전<br>국내 수준 | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관)*                 |
|------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|--|
|      |                                    |                                   | 1단계<br>(25~27) | 2단계<br>(28~29)   | 3단계<br>(30~32)   |                 |  |
| 1    | 물리부 크기                             | m <sup>3</sup>                    | < 3            | < 2              | < 2              | -               | -                                      |
| 2    | 레이저시스템 크기                          | m <sup>3</sup>                    | < 5            | < 1.5            | < 1.5            | -               | -                                      |
| 3    | 라만 레이저 위상 잡음                       | dBrad <sup>2</sup> /Hz<br>@ 1 kHz | < -100         | < -110           | < -110-          | -               | -                                      |
| 4    | 회전 속도 측정 감도<br>(angle random walk) | °/h <sup>1/2</sup>                | -              | 10 <sup>-2</sup> | 10 <sup>-3</sup> | -               | 4×10 <sup>-3</sup><br>(미국/Sandia Lab.) |
| 5    | 회전 속도 측정 안정도<br>(bias stability)   | °/h                               | -              | 10 <sup>-2</sup> | 10 <sup>-3</sup> | -               | 10 <sup>-1</sup><br>(미국/Sandia Lab.)   |
| 6    | 가속도 측정 감도<br>(sensitivity)         | μg/Hz <sup>1/2</sup>              | -              | 5                | 0.9 이하           | -               | 0.9<br>(미국/Sandia Lab.)                |
| 7    | 가속도 측정 안정도<br>(bias stability)     | μg/h                              | -              | 5                | 1 이하             | -               | 1<br>(미국/Sandia Lab.)                  |

\* 여기서 세계 최고수준은 이동형으로 양자 자이로 및 가속도계를 하나의 시스템에 구현하여 동시 측정하는 것으로 제한함. 실험실에서 다양한 형태의 양자 자이로나 가속도계가 개발되고 있으나, 항법용으로 사용하기 위해서는 이동형으로 소형화가 필요하고 회전속도와 가속도계를 동시에 측정 가능해야 함

\* 양자 자이로 및 가속도계를 하나의 시스템에 구현하지 않고 각각 구현할 경우 최종 목표치는 회전속도 측정 감도 10<sup>-5</sup> deg/h<sup>1/2</sup>, 회전속도 측정 안정도 10<sup>-4</sup> deg/h 이상을 제시하여야 함

\* 세계최고수준은 미국 Sandia National Lab.에서 발표한 논문 (Phys. Rev. Appl. 2, 054012, 21014) 이며, 미국 AOSense에서 개발하여 2024년 보잉사에서 항공기 탑재 및 테스트한 양자 자이로 및 가속도계의 성능은 공개되지 않음

## 5. 연구내용

### o 전체(1~3단계) 연구내용

- ① 원자 냉각 및 제어, 간섭계용 레이저 시스템 설계 및 제작
  - 레이저 냉각용 레이저, 라만 레이저, 검출 레이저 시스템 소형화
  - 제어 시스템 개발 및 소형화
  - 야외 환경 및 동적 환경에 동작할 수 있는 강건함 시스템 개발
- ② 물리부 설계 및 제작
  - 야외 환경 및 동적 환경에 동작할 수 있는 강건함 시스템 개발
- ③ 동적 환경에서 양자 자이로 및 가속도계 성능 평가 및 동작 검증
  - 동적 환경에서의 동작을 위해 물리부 및 레이저 시스템 개선 및 보강
  - 동작 환경에서 자세 제어 및 자세 보정 기술 개발
  - 야외 환경 및 동적 환경에 성능 평가 및 동작 검증

### o 1~2단계까지 연구내용

- ① 원자 냉각 및 제어, 간섭계용 레이저 시스템 설계 및 제작
  - 레이저 냉각용 레이저, 라만 레이저, 검출 레이저 시스템 소형화

- 제어 시스템 개발 및 소형화
- 야외 환경 및 동적 환경에 동작할 수 있는 강건함 시스템 개발

## ② 물리부 설계 및 제작

- 야외 환경 및 동적 환경에 동작할 수 있는 강건함 시스템 개발

## ③ 양자 자이로 및 가속도계 성능 평가 및 동작 검증

- 정적 환경에서 동작 및 성능 평가 및 동작 검증

## 6. 기대 효과

### ○ 과학기술적 파급효과

- 고전 센서 한계를 극복하는 고정밀 양자 관성 센싱 핵심 기술 확보
- 원자기반의 고정밀 양자 센싱에 기술 파급 효과
- 위성항법 재밍에 대비하고, 위성항법이 불가능한 수중, 도심, 계곡 등에서 無-위성 항법이 가능하도록 하는 국가 전략기술인 고정밀 양자관성센서 기술의 독자적인 확보
- 냉각 원자 간섭계 기술 확보로 중력과 검출, 암흑물질 탐색 등 기초과학 연구 인프라 구축 기반 마련

### ○ 경제적 파급효과

- 국방 및 첨단산업 혁신에 기여할 수 있도록 고전센서 대비 10~100배 정밀한 세계최고수준 양자 관성 센서 핵심 기술 확보
- 기존 관성 센서의 민감도, 정밀도, 안정도 등의 한계 극복을 통한 소형 정밀급 센서 시스템 개발을 통한 차세대 국방산업 육성에 기여
- 무인기 및 자율주행차량에 관성항법을 적용하여 위치오차를 획기적으로 줄이고, 안전하게 목적지까지 운행 가능하게 하는 첨단 산업에 기여
- 글로벌 양자 관성센서 시장 선점으로 신산업 창출 및 일자리 창출 효과
- 도심 항공 모빌리티(UAM) 및 우주 발사체 정밀 항법 시스템 핵심 부품 공급으로 미래 모빌리티 산업 경쟁력 확보

### ○ 사회적 기대효과

- 무-위성 항법을 위한 양자 관성 센서 기술로 지속적인 고정밀 항법, 자율 주행 등이 가능한 항공기, 선박 등의 안정적인 운항에 기여
- 북한 GPS 교란 공격에 대한 국가 안보 취약성 해소 및 안보 환경 개선
- 터널, 지하철, 건물 내부 등 실내 정밀 위치 서비스 실현으로 내비게이션 등 사회적 편의 지원
- 양자 기술 인력 양성 및 산학연 협력 생태계 구축으로 국가 양자기술 경쟁력 강화

## 7. 지원기간/예산/추진체계

○ 연구개발기간 : 8년 이내

○ 정부지원연구개발비 : '25년 13.61억원 이내

- 1~2단계까지 정부지원연구개발비 94.71억원 이내

- 3단계까지 총 정부지원연구개발비 203.64억원 이내

※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  | 기간  | 개월수            | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월       |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월       |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월      |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월      |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월      |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월      |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월      |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월      |
| 합계  | -   | 87개월           | 20,364백만원 |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

○ 주관기관 : 제한없음

- 1~2단계 산업계 참여 권고, (3단계~) 산업계 참여 필수

\* 3단계 산업계 참여 계획을 반드시 포함하여 제시할 것(참여형태 : 주관/공동/위탁연구개발기관)

|               |  |                   |
|---------------|--|-------------------|
| 연구유형          | 기초연구 ( ), 응용연구 ( ○ ), 개발연구 ( )   | TRL ( 2 )~( 5 )단계 |
| 과제특징          | 경쟁형( ), 경쟁형(챌린지)( ), SW자산뱅크등록( ), 공개SW( ), 기술료비징수( ), 국제협력R&D( ), 정책지정( ), 혁신도약형(○), 표준화연계( ), 사회문제해결형( ), 일자리연계( ), 소재부품장비( ), 규제샌드박스( ), 연구데이터공개( ), 사업화연계( ), IP-R&D연계( ) |                   |
| 구분            |  | 기술분야명/팀명          |
| 책임PM(과제기획위원장) |  | 양자 PM             |
| 담당 팀장         |  | 양자기술·산업팀          |
|               |  | 성명                |
|               |  | 오윤제               |
|               |  | 이민경               |

|   |   |         |
|---|---|---------|
| 관리번호  | 2025-양자센싱-2   | (지정공모형) |
| 기술분류  | 대분류(양자)-중분류(양자센싱)-소분류(양자관성센싱)-세분류(양자중력센싱)           |         |
| 중점분야  | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( ) |         |
| 기획유형  | 파괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )      |         |
| 과제명   | 원자기반 항법용 양자 중력 센서 개발                                |         |
| 1. 개요   |   |         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 원자의 간섭, 얽힘 등의 양자 특성을 활용하여 고정밀 중력 측정 센서 개발</li> <li>○ 기존 및 고전 센서의 감도 및 안정도를 뛰어넘는 고정밀 센서 개발</li> <li>○ 잠수함, 항공기, 선박 등에 탑재하여 운용하기 위해 1~2 단계에서는 현장 이동형 양자 중력 센서 핵심기술을 확보하고, 야외 환경에서 동작을 구현함. 3단계에서는 동적 환경에서 동작 가능한 센서 개발</li> </ul>  |   |         |
| 2. 현황 및 필요성   |   |         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (기존 기술현황) 고전 중력계는 성능 한계에 도달하여 추가적인 성능 개선이 거의 불가능할 것으로 예측되고 있으며, 연속 동작 및 잠수함 등에 탑재한 동적 환경에서 동작이 불가함. 무-위성 항법에 활용하기 위해서는 동적 환경에서 연속 동작이 가능한 양자 중력 센서 기술 확보가 필요함</li> <li>○ (필요성) 기존 중력 센서의 한계를 뛰어넘고, 야외 및 동적 환경에서 동작이 가능한 고정밀 양자 중력 핵심 기술 개발 연구를 통하여 국방, 항공, 우주 등의 분야에서 무-위성 항법을 위한 양자 중력 센서 개발 및 국가 전략기술 확보가 필요함 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 실험실 환경에서 동작하는 양자 중력계 기술은 세계 최고 수준에 도달하였으나, 현장 이동형 및 동적 환경에 동작하는 양자 중력 센서 기술은 아직 확보하지 못하고 있음</li> <li>- 미국의 경우 양자 중력계를 함정에 탑재하여 군사용으로 시험 운용한 결과를 발표하였고, 프랑스, 영국, 중국 등에서도 무-위성 항법을 위한 양자 중력계를 해군에 도입하기 위한 연구를 수행중임</li> <li>- 미국, 프랑스 등에서는 양자 중력계를 상용화하였으며, 프랑스의 경우 화산 활동 조기 경보를 위해 화산 주변에 양자중력계를 설치하여 운영중임</li> <li>- 위와 같은 양자 중력 센서 기술의 발전과 국제적인 동향을 고려할 때 국가 기술</li> </ul> </li> </ul> |   |         |

안보를 위한 양자 중력 센서 기술 개발이 필요하며, 이를 위한 국가적인 지원이 절실함

### 3. 수요분석

- (주요 수요처) 고정밀 양자 중력 센서는 전시나 위성 항법이 불가능한 환경에서 항법을 계속 유지 하기 위한 무-위성 항법용이나 지하 자원 탐지, 지하 구조물 탐지, 화산 활동 조기 탐지 등에 활용이 가능
  - (기초과학분야) 기본물리상수, 중력과 측정등 기초 과학분야에 활용될 수 있음
  - (국방분야) 재밍 등으로 위성항법이 불가능한 전시나 위성신호가 도달하지 않는 해저의 잠수함 등에서 무-위성 항법용으로 활용될 수 있음. 또한, 지하의 군사 시설, 땅굴 등의 지하 은닉 시설 탐지에 활용 가능함
  - (우주 항공 분야) 우주 환경에서는 위성 항법이 불가하므로, 위성 자세 제어, 경로 유지 등을 위해 활용 가능함
  - (자원탐사 탐지) 석유, 광물 등 자원 탐사에 활용
  - (국가 지리 분야) 한반도에 있는 중력기준점의 중력 측정 및 보정에 활용
- (협력방안) 국방 분야의 수요를 고려하여 국방 미래 기술로 채택될 수 있도록 하며, 관련 국방 분야와 협력함. 또한, 본 과제가 성공적으로 종료된 후에는 국방 분야에서 실용화를 위한 사업이 계속될 수 있도록 관련 기업 간 협력체계를 마련함

### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
  - 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원

#### ○ 최종목표 (3단계) : 원자기반 항법용 양자 중력 센서 개발

- 원자기반의 고정밀 양자 중력 기술 개발
- 연속 동작이 가능하고, 항공기, 선박, 잠수함 등에 탑재가 가능한 크기
- 잠수함 등에 탑재하여 이동 중에 중력 측정이 가능한, 즉, 동적 환경에서 동작 가능한 중력 센서 기술 개발

#### ○ 2단계 목표 : 현장 이동형 양자 중력 센서 개발

- 현장 이동이 가능한 양자중력 센서를 개발 (물리부 크기 2 m<sup>3</sup> 이하, 레이저 및 제어 시스템 크기 1.5 m<sup>3</sup> 이하)
- 중력 측정 감도 500 nm/(s<sup>2</sup> Hz<sup>1/2</sup>), 정밀도 20 nm/s<sup>2</sup> @ 1 d 달성  
(야외 정적 환경에서 성능 평가)

#### ○ 단계별 목표

| 구분               | 단계별 연구목표  |
|------------------|---|
| 1단계<br>(‘25~’27) | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 원자간섭계 기반 중력계 물리부 설계 및 제작</li> <li>○ 레이저 시스템 설계 제작               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 레이저 시스템 소형화 및 제어 시스템 제작</li> </ul> </li> <li>○ 라만 레이저 위상 잡음 평가</li> </ul> |
| 2단계<br>(‘28~’29) | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 현장 이동형 양자 중력 센서 물리부 설계 및 제작</li> <li>○ 레이저 시스템 소형화 및 온습도 및 진동 등 환경에 강건한 시스템 제작</li> <li>○ 중력 측정 감도 및 정밀도 평가</li> <li>○ 야외 정적 환경에서 중력가속도 측정 및 성능 최적화</li> </ul>                     |
| 3단계<br>(‘30~’32) | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 동적 환경 동작을 위한 물리부 설계 제작</li> <li>○ 동적 환경에서 자세 제어 및 자세 보정 기술 개발</li> <li>○ 동적 환경에서 중력 측정 감도 및 정밀도 평가</li> <li>○ 동적 환경에서 중력 측정 성능 최적화</li> </ul>                                      |

#### ○ 정량적 연구개발목표

| 성능지표 |                          | 단위                                     | 연구개발 목표치       |                      |                | 연구개발 전<br>국내 수준* | 세계 최고수준<br>(보유국/<br>보유기관)* |
|------|--------------------------|--|----------------|----------------------|----------------|------------------|----------------------------|
|      |                          |  | 1단계<br>(25~27) | 2단계<br>(28~29)       | 3단계<br>(30~32) |                  |                            |
| 1    | 레이저 시스템 크기<br>(제어시스템 포함) | m <sup>3</sup>                         | < 5            | < 1.5                | < 1.5          | -                | -                          |
| 2    | 물리부 크기                   | m <sup>3</sup>                         | < 3            | < 2                  | < 2            | -                | -                          |
| 3    | 라만 레이저 위상 잡음             | dBrad <sup>2</sup> /Hz<br>@ 1 kHz      | < -100         | < -110               | < -110-        | -                | -                          |
| 4    | 중력 측정 감도                 | nm/(s <sup>2</sup> Hz <sup>1/2</sup> ) | -              | 500<br>(야외 정적<br>동작) | 500<br>(동적 환경) | -                | 500<br>(프랑스/Exail)         |
| 5    | 중력 측정 정밀도                | nm/s <sup>2</sup><br>@ 1 d             | -              | 20<br>(야외 정적<br>동작)  | 20<br>(동적 환경)  | -                | 20<br>(프랑스/Exail)          |

\* 세계 최고수준으로 프랑스 Exail 사의 상용 제품의 성능이며, 야외 정적 환경에서 동작할때의 성능임. 동적 환경일때는 진동 등의 동적 환경에 대한 강건성 강화 및 자세 제어/보정 등의 기술이 추가되어야 하며, 동적 환경에서 성능은 아직 발표된 사례가 없음

## 5. 연구내용

#### ○ 전체(1~3단계) 연구내용



① 원자간섭계용 레이저 시스템 개발

- 레이저 냉각용 레이저, 라만 레이저, 검출 레이저 시스템 소형화
- 제어 시스템 개발 및 소형화
- 야외 환경 및 동적 환경에 동작할 수 있는 강건한 시스템 개발

② 원자간섭계용 물리부 개발

- 야외 환경 및 동적 환경에 동작할 수 있는 강건한 시스템 개발

③ 양자 중력계 성능 평가 및 동작 검증

- 동적 환경에서의 동작을 위해 물리부 및 레이저 시스템 개선 및 보강
- 동작 환경에서 자세 제어 및 자세 보정 기술 개발
- 야외 환경 및 동적 환경에서의 성능 평가 및 동작 검증

○ 1~2 단계까지 연구내용

① 원자 냉각 및 제어, 간섭계용 레이저 시스템 설계 및 제작

- 레이저 냉각용 레이저, 라만 레이저, 검출 레이저 시스템 소형화
- 제어 시스템 개발 및 소형화
- 야외 환경 및 동적 환경에 동작할 수 있는 강건함 시스템 개발

② 물리부 설계 및 제작

- 야외 정적 환경에 동작할 수 있는 강건함 시스템 개발

③ 양자 중력 센서 성능 평가 및 동작 검증

- 야외 정적 환경에서 동작 및 성능 평가 및 동작 검증

## 6. 기대 효과

○ 과학기술적 파급효과

- 위성항법 재밍에 대비하고, 위성항법이 불가능한 수중, 도심, 계곡 등에서 無-위성 항법이 가능하도록 하는 국가 전략기술인 고정밀 양자중력센서 기술의 독자적인 확보
- 중력상수, 미세구조상수 측정, 중력과 검증 등의 기초과학 및 정밀 측정과학에 활용

○ 경제적 파급효과

- 국방 및 첨단산업 혁신에 기여할 수 있도록 고전센서 대비 10~100배 정밀한 세계 최고수준 양자 중력 센서 핵심 기술 확보
- 無-위성 항법 시스템을 위한 중력지도 작성

- 국가 안전망을 위한 고감도 양자중력계 센서로 활용 가능 (중력분포 및 변화 측정을 통한 지하 구조, 지층변화 등을 감지, 지진파 감지를 통한 지진 진원지, 지진 발생시점 등 정밀 측정)
  - 중력분포 측정을 통한 자원 탐사에 활용 (고감도, 고신뢰도, 재현 가능한 중력 측정으로 지구 내부 분포 측정을 통한 자원 탐사)
- 사회적 기대효과
- 국가 중력 표준기로 사용하여 국가 중력기준점 측정 및 소급성 제공
  - 무-위성 항법을 위한 양자 관성 센서 기술로 지속적인 고정밀 항법, 자율 주행 등이 가능한 항공기, 선박 등의 안정적인 운항에 기여
  - 자연재해 조기 탐지 등에 활용하여 안전한 사회 구현에 기여

## 7. 지원기간/예산/추진체계

○ 연구개발기간 : 8년 이내

○ 정부지원연구개발비 : '25년 13.61억원 이내

- 1~2단계까지 정부지원연구개발비 75.74억원 이내

- 3단계까지 총 정부지원연구개발비 150.56억원 이내

※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  |     | 기간             | 개월수  | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월  | 1,361백만원  |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월  | 2,607백만원  |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월 | 1,202백만원  |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월 | 1,202백만원  |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월 | 1,202백만원  |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월 | 2,841백만원  |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월 | 2,368백만원  |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월 | 2,273백만원  |
| 합계  |     | -              | 87개월 | 15,056백만원 |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

○ 주관기관 : 제한없음

- 1단계부터 산업계 참여 권고, (2단계~) 산업계 참여 필수

\* 2단계부터 산업계 참여가 필수이나 연구개발 수행 중에 포함하는 것을 허용, 다만 이 경우는 산업계 참여 계획을 반드시 포함하여 제시할 것(참여형태 : 주관/공동/위탁연구개발기관)

|      |                                |                   |
|------|--------------------------------|-------------------|
| 연구유형 | 기초연구 ( ), 응용연구 ( ○ ), 개발연구 ( ) | TRL ( 2 )~( 5 )단계 |
|------|--------------------------------|-------------------|

|      |  |          |     |
|------|--|----------|-----|
| 과제특징 | 경쟁형( ), 경쟁형(챌린지)( ), SW자산뱅크등록( ), 공개SW( ), 기술료비징수( ), 국제협력R&D( ), 정책지정( ), 혁신도약형(○), 표준화연계( ), 사회문제해결형( ), 일자리연계( ), 소재부품장비( ), 규제샌드박스( ), 연구데이터공개( ), 사업화연계( ), IP-R&D연계( ) |          |     |
|      | 구분   | 기술분야명/팀명 | 성명  |
|      | 책임PM(과제기획위원장)  | 양자 PM    | 오윤제 |
|      | 담당 팀장  | 양자기술·산업팀 | 이민경 |

|  |   |         |
|--|---|---------|
| 관리번호   | 2025-양자센싱-3   | (지정공모형) |
| 기술분류   | 대분류(양자)-중분류(양자센싱)-소분류(양자시간주파수센싱)-세분류(양자원자시계, 양자광주파수합성기) |         |
| 중점분야   | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( )     |         |
| 기획유형   | 파괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )          |         |
| 과제명  | 다중 원자 전이와 다중 대역 광빔 기반 차세대 광주파수 원자시계 개발                  |         |
| 1. 개요  |   |         |
| <div>○ 초소형 양자 시간 센서 기술은 광집적회로 기술을 원자 물리 시스템에 적용하여 원자의 양자 상태 간 전이를 정밀 측정하여 정확하고 안정적인 시각·주파수 정보를 생성 및 분배 하는 기술임</div> <div>- 항법, 무선통신, 국가 전력망, 국방무기체계, 등에 필수적인 GPS 시각 신호를 보정 하기 위해서는 현 수준보다 정확한 휴대용 시계가 요구됨</div> <div>- 양자 기술을 기반으로 하는 원자시계는 가장 성숙한 양자센서 플랫폼으로서 고정확도 시간 측정 및 고정밀 시각 동기화에 활용 가능함</div> <div>- 고정확도 원자시계를 온칩 기술을 기반으로 소형화하기 위한 연구가 선진국 중심으로 활발히 진행 중이며 차세대 원자시계로서 광주파수 영역으로 확장되고 있음</div>   |   |         |
| 2. 현황 및 필요성  |   |         |
| <div>○ (기존 기술현황) 실험실형 및 이동형 광주파수 원자시계가 <math>10^{-17}</math> - <math>10^{-19}</math> 수준으로 국내외에서 개발되고 있음</div> <div>- 칩스케일의 원자시계가 미국에서 최초 상용화되었으며, 최근 초소형 원자시계의 성능 고도화 및 응용 확장 중심으로 전세계적으로 연구가 활발히 진행 중</div> <div>- 국내에서는 한국표준과학연구원과 한국과학기술원에서 실험실형·이동형 광주파수 원자시계, 칩스케일 원자시계, 초소형 광주파수 합성기 개발 연구가 진행 중</div> <div>- 현 개발 단계에서는 확장형, 현장 맞춤형 초소형 광주파수 원자시계의 개발이 절실히 요구되는 시점임</div> <div>○ (필요성) 고정확도 원자시계는 정밀 항법을 위한 기반 핵심 기술로서 다양한 이유로 GPS의 시각 및 주파수 신호를 받지 못하는 상황에서 대체 할 수 있는 장치(휴대형 원자시계)가 필요</div> <div>- 무GPS 상황: 신호 Jamming 및 Spoofing, 이온층 간섭, 전시 상황으로 인한 신호 암호화, 건물과 지형과 같은 물리적 장애물, 잠수 환경, 우주 환경 등</div> <div>- 시각 및 주파수 정보는 항법뿐만 아니라 다른 물리량 (길이, 질량, 전류, 온도, 광도, 등) 측정에 활용되어 다양한 센서의 고정확도 측정을 가능하게 함</div> |   |         |

### 3. 수요분석

- (주요 수요처) GPS에 의존하여 시각 및 항법 정보를 제공 받는 모든 기관과 산업
  - 통신 산업 : 데이터 전송의 효율성과 안정성을 위해 고정확도 시각 동기화가 필요한 차세대 통신 네트워크
  - 국방 및 항공우주 : 군사 무기체계, 보안 통신망, 독립 항법 시스템, deep space 항법 시스템
  - 첨단 과학기술 및 표준 연구기관 : 초정밀 측정 및 물리 단위의 생성 및 보급
  - 정부 및 산업 : 국가표준시 배포, 금융 거래 시각 동기화, 전력망 동기화
- (협력방안) 국방 분야의 수요를 고려하여 국방 미래 기술로 채택될 수 있도록 하며, 관련 국방 분야와 협력함. 또한, 본 과제가 성공적으로 종료된 후에는 국방 분야에서 실용화를 위한 사업이 계속될 수 있도록 관련 기업 간 협력체계를 마련함

### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
- 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원

- **최종목표(3단계) : 실용성과 확장성을 확보한 다중 원자 전이 기반 차세대 온칩 광주파수 원자시계 개발**
  - 단일 온칩 모듈 내 다중 (3개 이상) 원자 전이 기준주파수 (광주파수 및 마이크로파) 제공 원자셀 개발
  - 다중대역 온칩 광주파수빔 생성 및 모드잠금 기술 개발
  - PIC기반 복합(원자-광자-파장변환) 인터페이스 기술 개발
  - 온칩 기반 휴대형 광주파수 원자시계 개발 (19"랙 4U)
  - 타 양자센서 플랫폼과 연계한 기준주파수 제공 시연
- **2단계 목표 : 이중 원자 전이 기반 차세대 온칩 광주파수 원자시계 및 광집적화 요소 기술 개발**
  - 단일 온칩 모듈 내 다중 (2개 이상) 원자 전이 기준주파수(광주파수 및 마이크로파) 제공 원자셀 개발

- 이중대역 온칩 광주파수빔 생성 및 모드잠금 기술 확보(장기 안정도  $9 \times 10^{-13}$  달성)
- 고효율 다중 원자셀을 위한 PIC 핵심 기술 확보

#### ○ 단계별 목표

| 구분  | 단계별 연구목표   |
|-----|--|
| 1단계 | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 단일 공진기 기반 다중대역 광주파수빔 생성 및 모드잠금 기반기술 개발</li> <li>○ 원자 전이선과 광주파수빔 간 연결을 위한 온칩 광자 파장변환 기술 개발</li> <li>○ 온칩 기반 원자시계 모듈 패키징 원천 기술 개발</li> <li>○ 다중 원자셀을 위한 고효율 광집적 원자-광자 인터페이스 원천 기술 개발</li> <li>○ PIC를 통한 원자스핀 제어 원천 기술 개발</li> </ul>   |
| 2단계 | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 다중대역 광주파수빔 생성·모드잠금 기술 고도화 및 시연</li> <li>○ 온칩 광자 파장변환기에 기반한 광주파수빔의 원자 전이선 잠금 및 안정화</li> <li>○ 초소형 온칩 기술 기반 휴대형 원자시계 모듈 개발</li> <li>○ 고효율 다중 원자셀 소자 개발</li> <li>○ 원자스핀 제어를 위한 PIC 소자 설계 기술 개발</li> </ul>  |
| 3단계 | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 다중대역 광주파수빔의 다중원자셀 전이선 잠금 기술 개발</li> <li>○ 온칩 광자 파장변환 기술 기반 광주파수빔 대역변환 기술 개발</li> <li>○ 현장 맞춤형 차세대 광주파수 합성기 개발               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 초소형 고효율 다중 원자셀, 온칩 광주파수빔, 광집적 파장변환기 복합 소자 개발</li> <li>- PIC 기반 원자스핀 제어 시스템 개발</li> </ul> </li> </ul> |

#### ○ 정량적 연구개발목표

| 성능지표 |  | 단위                 | 연구개발 목표치            |                     |                     | 연구개발 전<br>국내 수준 | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관)* |
|------|--|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------|------------------------|
|      |  |                    | 1단계<br>(25~27)      | 2단계<br>(28~29)      | 3단계<br>(30~32)      |                 |                        |
| 1    | 다중 칩셀 광·원자 융합칩<br>채널 개수                    | 개                  | 2                   | 4                   | 6                   | 없음              | 없음                     |
| 2    | 단일 온칩모듈 분광 가능<br>원자 전이 개수                  | 개                  | 1                   | 2                   | 3                   | 1               | 1                      |
| 3    | 다중원자모듈 잠금된 온칩<br>광주파수 합성기 안정도<br>(@200 s)  | Hz/Hz              | $9 \times 10^{-13}$ | $9 \times 10^{-13}$ | $5 \times 10^{-14}$ | 없음              | $2 \times 10^{-14}$    |
| 4    | 원자칩셀과 연동 가능한<br>다중대역 온칩 광주파수빔<br>생성 및 모드잠금 | 대역수                | -                   | 2                   | 3                   | 없음              | 없음                     |
| 5    | 물리부 시스템 크기                                 | 19"<br>Rack<br>(U) | -                   | 6                   | 4                   | 없음              | 없음                     |

\* 안정도의 경우 단일 원자전이선에 안정화된 CW 레이저의 안정도 결과임. 다중원자모듈에 광주파수합성기까지 안정화한 사례는 없으며 이때 잡음 성분은 CW 레이저의 안정도보다 높아짐

## 5. 연구내용

#### ○ 전체(1~3단계) 연구내용

- ① 단일 온칩 모듈 내 다중 (3개 이상) 원자 전이 기준주파수(광주파수 및 마이크로파)
  - Rb, Cs, Sr 등 다양한 원자종 칩셀들을 하나의 온칩 모듈 내에서 독립적으로 제어, 측정 가능하도록 광집적회로 설계 및 제작
  - 다중 원자 전이를 통해 다중 광주파수(VIS~NIR)와 마이크로파 기준주파수 생성
- ② 다중대역 온칩 광주파수빔 생성 및 모드잠금 기술 개발
  - 원자셀 제공 기준주파수와 연동 가능한 실용성 높은 광주파수빔 파장대역군 선정 및 해당 다중대역 광빔 생성을 위한 온칩 소자 플랫폼 개발
  - 다중 대역 광주파수빔 생성 기술 개발 및 소형화 가능한 모드잠금(자발적 모드 잠금 등) 기술 개발
- ③ PIC기반 복합(원자-광자-파장변환) 인터페이스 기술 개발
  - 온칩 광학모드 파면 제어 기반 고효율 광집적 원자-광자 인터페이스 기술 개발
  - 강유전체 박막 기반 온칩 광자 파장변환 및 주파수 합성 인터페이스 개발
- ④ 온칩 기반 휴대형 광주파수 원자시계 개발 (19"랙 4U)
  - 원자 기반 광주파수 기준기, 온칩 광주파수빔, 온칩 파장변환기가 모두 포함된 휴대형 광주파수 원자시계를 19"랙 형태로 개발
  - 칩스케일 원자셀, 온칩 광공진기, 파장변환 소자와 관련 광전자 제어 부품(전원 및 증폭장치 제외)들을 4U 크기 시스템으로 패키징
- ⑤ 타 양자센서 플랫폼과 연계한 기준주파수 제공 시연
  - 2단계 종료전 목표 양자센서 플랫폼 선정
  - 3단계 내 타 양자센서 플랫폼에 기준주파수 제공 시연

#### o 1~2 단계까지 연구내용

- ① 단일 온칩 모듈 내 이중 원자 전이 기준주파수(광주파수 및 마이크로파)
  - 2종의 (Rb, Cs, Sr 등) 칩셀들을 하나의 온칩 모듈 내에서 독립적으로 제어, 측정 가능하도록 광집적회로 설계 및 제작
  - 이중 원자 전이를 통해 다중 광주파수(VIS~NIR)와 마이크로파 기준주파수 생성
- ② 이중대역 온칩 광주파수빔 생성 및 모드잠금 기술 개발
  - 원자셀 제공 기준주파수와 연동 가능한 실용성 높은 광주파수빔 파장대역군 선정 및 해당 다중대역 광빔 생성을 위한 온칩 소자 플랫폼 개발
  - 이중 대역 광주파수빔 생성 기술 개발 및 소형화 가능한 모드잠금(자발적 모드 잠금 등) 기술 개발
- ③ 온칩 기반 휴대형 광주파수 원자시계 개발 (19"랙 6U)
  - 원자 기반 광주파수 기준기, 온칩 광주파수빔, 온칩 파장변환기가 모두 포함된 휴대형 광주파수 원자시계를 19"랙 형태로 적용 가능한 기술 개발
  - 칩스케일 원자셀, 온칩 광공진기, 파장변환 소자와 관련 광전자 제어 부품(전원 및 증폭장치 제외)들을 6U 해당 크기 시스템 구현

## 6. 기대 효과

### ○ 과학기술적 파급효과

- 다중의 고정밀 광주파수 생성 및 합성 기술 확보
- 여러 장치를 칩크기로 개발하고, 하나의 초소형 시스템으로 구성하는 온칩 기술 확보

### ○ 경제적 파급효과

- 고정밀도 광주파수 원자시계의 초소형화 연구를 통해 GPS 대체 항법 정치 마련
- 통신 산업 : 차세대 통신 네트워크 기반 기술 확보
- 국방 및 항공우주 : 복원력이 강한 첨단무기체계 및 우주 항법 기반 기술 확보
- 첨단 과학기술 및 표준 연구기관 : 차세대 고정밀·고정밀도 측정을 위한 기준 확보
- 정부 및 산업 : 안정적이고 공정한 통신 및 금융 거래를 위한 기반 확보

### ○ 사회적 기대효과

- 다양한 타 양자센서에 고정밀 시간주파수 신호 제공하므로 양자센서 전반의 신뢰성 제고 및 활용성 대폭 확장

## 7. 지원기간/예산/추진체계

### ○ 연구개발기간 : 8년 이내

### ○ 정부지원연구개발비 : '25년 9.07억원 이내

- 1~2단계까지 정부지원연구개발비 73.21억원 이내
- 3단계까지 총 정부지원연구개발비 158.44억원 이내

※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  |     | 기간             | 개월수  | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월  | 907백만원    |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월  | 2,235백만원  |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월 | 1,393백만원  |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월 | 1,393백만원  |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월 | 1,393백만원  |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월 | 2,841백만원  |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월 | 2,841백만원  |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월 | 2,841백만원  |
| 합계  |     | -              | 87개월 | 15,844백만원 |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음



○ 주관기관 : 제한없음

- 1~2단계 산업계 참여 권고, (3단계~) 산업계 참여 필수

\* 3단계 산업계 참여 계획을 반드시 포함하여 제시할 것(참여형태 : 주관/공동/위탁연구개발기관)

|               |  |          |                   |
|---------------|--|----------|-------------------|
| 연구유형          | 기초연구 (    ), 응용연구 ( ○ ), 개발연구 (    )   |          | TRL ( 2 )~( 5 )단계 |
| 과제특징          | 경쟁형(    ), 경쟁형(챌린지)(    ), SW자산뱅크등록(    ), 공개SW(    ), 기술료비징수(    ),<br>국제협력R&D(    ), 정책지정(    ), 혁신도약형(○), 표준화연계(    ), 사회문제해결형(    ),<br>일자리연계(    ), 소재부품장비(    ), 규제샌드박스(    ), 연구데이터공개(    ), 사업화연계(    ),<br>IP-R&D연계(    ) |          |                   |
| 구분            |  | 기술분야명/팀명 | 성명                |
| 책임PM(과제기획위원장) |  | 양자 PM    | 오윤제               |
| 담당 팀장         |  | 양자기술·산업팀 | 이민경               |

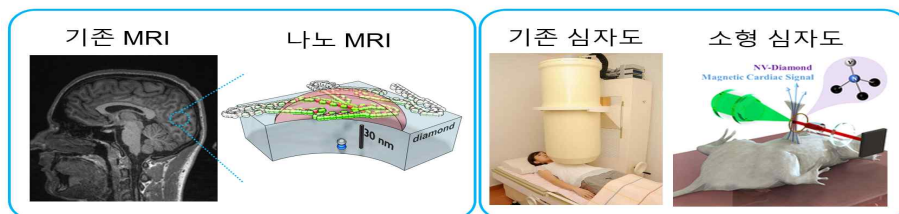
|           |   |                    |
|-----------|---|--------------------|
| 관리번호      | 2025-양자센싱-4   | (지정공모형, 통합형 총괄/세부) |
| 기술분류      | 대분류(양자)-중분류(양자센싱)-소분류(양자전·자기장센싱)-세분류(양자자기장센싱)       |                    |
| 중점분야      | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( ) |                    |
| 기획유형      | 과괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )      |                    |
| 총괄<br>과제명 | 다이아몬드 NV 센터 기반 고감도 고분해능 양자 MRI, 심자도 기술 개발           |                    |
| 세부<br>과제명 | (총괄/세부1) 다이아몬드 NV 센터 기반 고감도 고분해능 양자 MRI 기술 개발       |                    |

## 1. 개요

### ○ (통합형 총괄과제)

- 고감도, 고해상도, 상온 구동, 소형 센서 크기, 생체 친화적 특성 등의 다양한 장점으로 인해 바이오·의료분야의 차세대 센서로 활용 잠재력이 높은 다이아몬드 NV 센터 기반 양자자기장 센싱 핵심응용기술 개발 및 센서 제작을 목표로 함
- 상온 환경에서 비침습적인 방법으로 생체 정밀 측정이 가능한 다이아몬드 NV 센터 기반의 고감도, 고해상도 양자자기장 센싱 및 이미징 기술을 개발함
- 나노 MRI, 소형 심자도 등 바이오·의료 분야에 활용 가능한 센서·이미징 장치의 초기 버전을 개발하고 유사환경에서 성능을 데모함

NV 센터 기반 양자자기장 센서 바이오·의료 분야 활용



< 통합형 과제 개념 소개 >

- 본 통합형 총괄과제는 “다이아몬드 NV 센터 기반 고감도 고분해능 양자 MRI 기술 개발”로 총괄/세부1, 세부2 등 아래와 같이 구성됨

<통합형 총괄-세부 과제 구성도>



○ (총괄/세부1)

- 고해상도 정밀 분석과 이미징이 가능한 다이아몬드 NV 센터 기반의 상온 나노·마이크로 NMR·MRI 핵심응용기술을 개발함
- 나노·마이크로 MRI 이미징 장치를 개발하고 실험실 환경 및 나아가 바이오·의료 분야에 활용 가능한 유사환경에서 성능을 데모함

## 2. 현황 및 필요성

○ (기존 기술현황)

- (통합형 총괄) Hall, electric coils, SQUID 기반의 기존 자기장 센싱 기술은 MRI, 심자도·뇌자도, 바이오마커 등 다양한 바이오·의료 분야에서 활발히 사용되고 있는 중요한 기술임. 하지만, 나노·마이크로미터 수준의 NMR·MRI, 분자 수준의 세포·단백질 구조 분석, 극미량의 바이러스 신속 검출, 미세 국소 질병 조기 발견 등이 가능하기 위해서는 현재의 수 밀리미터 수준의 해상도, 마이크로 테슬라 수준의 민감도, 극저온 구동 환경 등의 한계점을 극복하고 나아가 실제 바이오·의료 현장에 적용 가능한 핵심응용 및 센서 개발 기술을 확보해야 함[1]
- (총괄/세부1) 기존 NMR·MRI 기술은 높은 활용도에도 불구하고 밀리미터 수준의 해상도 한계와 거대 의료장비, 극저온 및 고가의 구동 조건 등의 문제점을 갖고 있음. 차세대 기술인 양자자기장 센싱 기술을 개발하여 이러한 한계점을 극복하고, 실제 바이오·의료 현장에 적용 가능한 실온·생체환경 구동, 고해상도 NMR·MRI 핵심응용 및 센서 개발 기술을 확보해야 함

[1] 사례: 하버드대에서 spin-off한 미국 QDTI사의 경우, 실험실 차원의 NV 센터 기반 바이오 양자센싱 기술을 제품으로 개발하기 위해 10년 가까운 응용기술 개발 과정이 필요했음 (2013-2022). <https://qdti.com/>

○ (필요성)

- (통합형 총괄) 다이아몬드 NV 센터는 상온 생체환경에서 비침습적이고 무독성적인 방법으로 미세 신호 측정 및 분석이 가능하기 때문에, 바이오·의료분야에서 차세대 정밀센서로 활용될 수 있는 대표적인 양자자기장 센서 플랫폼임. 단일 큐비트 수준에서는 나노·마이크로미터 수준의 고해상도, 나노테슬라 수준의 고감도가 가능하고, 앙상블 큐비트 수준에서는 밀리미터 수준의 소형 센서, 피코테슬라 수준의 고감도 센싱이 가능함[2]. 따라서, 본 과제에서는 NV 센터 기반 양자자기장 센싱 및 이미징 핵심응용기술을 고도화하고, 나아가 나노·마이크로 MRI, 소형 심자도 등의 센서로 발전시켜 바이오·의료 분야에 활용 가능하도록 지원할 필요가 있음
- (총괄/세부1) 다이아몬드 NV 센터는 나노·마이크로미터 수준의 고해상도, 나노 테슬라 수준의 고감도를 유지하면서도 상온 생체환경에서 동작이 가능하기 때문에, 차세대 NMR·MRI, 세포·단백질 분석, 극미량 바이러스 검출 등 바이오·의료

분야에 활용될 수 있는 높은 잠재력을 갖고 있음. 따라서, 본 세부과제에서는 단일·소규모 NV 센터 기반 양자자기장 센싱 및 NMR 계측에 필요한 핵심응용 기술을 개발하고, 나아가 나노·마이크로 MRI 이미징 시스템으로 발전시켜 바이오·의료 분야에 활용 가능하도록 지원할 필요가 있음

[2] N. Aslam et al., Quantum sensors for biomedical applications, Nature Review Physics, 5, 157-169 (2023).

### 3. 수요분석

#### ○ (주요 수요처)

- 국내외 바이오·의료기관, 장비 업체, 센서 기업 등 고감도, 고해상도 양자자기장 센서 활용 및 제작 관련 기관들과 기업들이 주요 수요처로 예상됨

#### ○ (협력방안)

- (세부2) “양상블 NV 센터 기반 소형자기장센서 및 심자도 기술 개발” 과제와 협력을 통해, 다이아몬드 공정, NV 센터 생성, 광구조체 제작, 자기장 센싱 공통 프로토콜 등 공동 개발이 필요함
- 양자플래그십 내 ‘고체 점결함 양자얽힘 큐비트쌍 기반 고전 한계 극복 양자센싱 핵심기술 개발’ 과제와의 기술 연계 및 협력 연구를 통하여, 얽힘 기반 양자센싱 기술이 바이오·의료 분야 응용에 접목될 수 있도록 협력 방안 모색이 필요함 (2단계 후반 및 3단계). 양자플래그십 과제 간 상호 기술 워크숍 및 공동 개발 프로그램 운영을 통한 연구 시너지 창출을 꾀할 수 있음
- 바이오·의료 연구기관, 병원, 의료 장비 및 센서를 개발하는 국내 관련 기관과 기업이 과제에 참여하거나 협력하는 방안이 필요함

### 4. 연구목표

#### <필수 사항>

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
  - 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원
- 본 RFP는 통합형 총괄-세부과제 유형으로 총괄/세부1, 세부2로 구성
  - RFP에서 제시하는 총괄/세부1, 세부2 과제 연구범위가 포함된 통합형 과제 형태로 제안 필수
  - 제안시 효율적인 연구수행 및 지원을 위해 총괄/세부1과 세부2 과제 간 연계방안 및 협력 등 전략을 제시할 것

## □ 총괄과제

### ○ 최종목표(3단계) : NV 센터 기반 양자 MRI, 심자도 개발 및 성능 검증

#### (1) (총괄/세부1) 고감도 고분해능 양자 MRI 기술 개발

- 민감도:  $5 \text{ nT/Hz}^{0.5}$  이하 (단일큐비트),  $30 \text{ nT} \cdot \mu\text{m}^{1.5}/\text{Hz}^{0.5}$  이하 (소규모큐비트)
- 공간분해능:  $10 \text{ nm}$  이하 (단일큐비트),  $500 \text{ nm}$  이하 (소규모큐비트)
- 주파수분해능:  $1 \text{ ppm(part-per-million)}$  이하
- MRI 이미징 장비 개발 및 유사환경에서 데모

#### (2) (세부2) 소형 자기장 센서 및 심자도 기술 개발

- 민감도:  $100 \text{ pT/Hz}^{0.5}$  이하
- 시간 분해능:  $1 \text{ ms}$  이하
- 센서 크기:  $5 \text{ cm}^3$  이하 (외부 패치형),  $5 \text{ mm}^2$  이하 (내부 삽입형)
- 소형 심자도 센서 개발 및 유사환경에서 데모

### ○ 2단계 목표 : 고감도 고해상도 양자 MRI, 고감도 소형 심자도 핵심 기술 개발

#### (1) (총괄/세부1) 고감도 고분해능 양자 MRI 기술 개발

- 민감도:  $10 \text{ nT/Hz}^{0.5}$  이하 (단일큐비트),  $50 \text{ nT} \cdot \mu\text{m}^{1.5}/\text{Hz}^{0.5}$  이하 (소규모큐비트)
- 공간분해능:  $30 \text{ nm}$  이하 (단일큐비트),  $700 \text{ nm}$  이하 (소규모큐비트)
- 주파수분해능:  $100 \text{ ppm}$  이하
- 2종 이상 NMR, chemical shift 측정 및 2·3차원 MRI 이미징 기술 개발
- 실험실 환경에서 나노·마이크로 NMR·MRI 데모

#### (2) (세부2) 소형 자기장 센서 및 심자도 기술 개발

- 민감도:  $300 \text{ pT/Hz}^{0.5}$  이하
- 시간 분해능:  $5 \text{ ms}$  이하
- 센서 크기:  $10 \text{ cm}^3$  이하 (외부 패치형),  $10 \text{ mm}^2$  이하 (내부 삽입형)
- 실험실 환경에서 심자도 신호 모사 데모

### ○ 단계별 목표

| 구분               | 단계별 연구목표   |
|------------------|--|
| 1단계<br>(‘25~’27) | <p>(1) (총괄/세부1) 다이아몬드 NV 센터 기반 NMR·MRI 핵심 기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- NMR 신호 측정 양자센싱 기술 개발, NMR 신호 증폭 기술 개발</li> <li>- 나노·마이크로 2차원 MRI 이미징 데모</li> <li>- 2종 이상 핵스핀 주파수 구분 측정</li> </ul> <p>(2) (세부2) 앙상블 NV 센터 기반 펄스 자기장 신호 측정 기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 앙상블 기반 자기장 민감도, 결맞음 향상 및 잡음 제어 기술 개발</li> <li>- 자기장 펄스 신호 측정 기술 개발</li> <li>- 외부 측정용 비삽입·패치형 소형 센서 개발</li> <li>- 전류회로 테스트 샘플 기반 유사 심자도 신호 테스트 진행</li> </ul>   |
| 2단계<br>(‘28~’29) | <p>(1) (총괄/세부1) 다이아몬드 NV 센터 기반 나노·마이크로 NMR·MRI 이미징 데모</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- NMR 신호 측정, 신호 증폭 기술 고도화</li> <li>- 핵스핀 chemical shift 측정</li> <li>- 성능 검증: 실험실 환경에서 나노·마이크로 MRI 이미징 데모</li> <li>- 민감도, 분해능: 10 nT/Hz<sup>0.5</sup>, 30 nm, 100 ppm, (단일큐비트), 50 nT·μm<sup>1.5</sup>/Hz<sup>0.5</sup>, 700 nm, 100 ppm (소규모큐비트)</li> </ul> <p>(2) (세부2) 앙상블 NV 센터 기반 심자도 측정 기술 개발 및 테스트 실험 진행</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 소형 센서 내 자기장 민감도, 펄스 시간 분해능 고도화 기술 개발</li> <li>- 광섬유·내시경과 결합된 내부 측정용 삽입형 소형 센서 개발</li> <li>- 성능 검증: 실험실 환경에서 생체 테스트 샘플 기반 심자도 신호 측정 데모</li> <li>- 민감도, 센서 크기: 300 pT/Hz<sup>0.5</sup>, 10 cm<sup>3</sup>(외부 패치형)/10 mm<sup>2</sup>(내시경 삽입형)</li> </ul> |
| 3단계<br>(‘30~’32) | <p>(1) (총괄/세부1) 바이오·의료분야 활용 가능한 나노·마이크로 MRI 이미징 장치 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 패키지화된 MRI 이미징 장치 초기 버전 제작</li> <li>- 성능 검증: 유사환경에서 나노·마이크로 MRI 이미징 데모</li> <li>- 민감도, 분해능: 5 nT/Hz<sup>0.5</sup>, 10 nm, 1 ppm, (단일큐비트), 30 nT·μm<sup>1.5</sup>/Hz<sup>0.5</sup>, 500 nm, 1 ppm (소규모큐비트)</li> </ul> <p>(2) (세부2) 의료분야 활용 가능한 소형 심자도 장치 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 소형 심자도 센서 초기 버전 제작</li> <li>- 성능 검증: 유사 환경에서 생체 테스트 샘플 기반 심자도 신호 측정 데모</li> <li>- 민감도, 센서 크기: 100 pT/Hz<sup>0.5</sup>, 5 cm<sup>3</sup>(외부 패치형)/5 mm<sup>2</sup>(내시경 삽입형)</li> </ul>   |

#### ○ 정량적 연구개발 목표

| 성능지표  | 단위                            | 연구개발 목표치  |                |                     | 연구개발 전<br>국내 수준                                   | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관) |  |
|---|-------------------------------|---|----------------|---------------------|---|-----------------------|--|
|   |                               | 1단계<br>(25~27)  | 2단계<br>(28~29) | 3단계<br>(30~32)      |   |                       |  |
| (총괄/세부1) 다이아몬드 NV 센터 기반 고감도 고분해능 양자 MRI 기술 개발 |                               |   |                |                     |   |                       |  |
| 1   | NMR 측정을 위한<br>자기장 민감도         | nT/Hz <sup>0.5</sup> (단일큐비트) /<br>nT·μm <sup>1.5</sup> /Hz <sup>0.5</sup><br>(소규모큐비트) | 30 /<br>100    | 10 /<br>50          | 5 / 30  | 50 / 100              | 18 / 34<br>(미국/하버드,<br>미국/메릴랜드) <sup>3,4</sup> |
| 2   | MRI 이미징을 위한<br>공간분해능          | nm/μm   | 50 / 1         | 30 /<br>0.7         | 10 /<br>0.5                                       | 20-50 / 1             | 5 / 1<br>(독일/함부르크,<br>미국/메릴랜드) <sup>5,4</sup>  |
| 3   | NMR 측정을 위한<br>주파수분해능          | ppm   | 1000           | 100                 | 1   | 1000                  | 1-10 (미국/하버드,<br>스위스/ETH) <sup>6,7</sup>       |
| 4   | (정성) MRI 이미징 장치<br>개발 및 성능 데모 | 정성  | -              | 실험실<br>환경에서<br>성능데모 | 이미징<br>장치<br>초기<br>버전<br>개발 및<br>유사환경<br>에서<br>데모 | 없음                    | 실험실 수준에서<br>2차원 MRI 데모                         |
| (세부2) 양상블 NV 센터 기반 소형자기장센서 및 심자도 기술 개발        |                               |   |                |                     |   |                       |  |
| 1   | 심자도 신호 측정을<br>위한 자기장 민감도      | pT<br>/Hz <sup>0.5</sup>  | 1000           | 300                 | 100   | 1000                  | 140 (일본/동경대) <sup>8</sup>                      |
| 2   | 펄스 신호 측정 가능한<br>시간 분해능        | ms  | 10             | 5                   | 1   | 100                   | 15 (중국/USTC) <sup>9</sup>                      |
| 3   | 소형 센서 크기 (외부<br>패치형/내시경 삽입형)  | cm <sup>3</sup><br>/ mm <sup>2</sup>  | 100 /<br>100   | 10 /<br>10          | 5 / 5   | 100 / -               | 100<br>(일본/동경대) <sup>8</sup> / -               |
| 4   | 심자도 신호 측정                     | SNR   | -              | 3                   | 10  | -                     | 8 (일본/동경대) <sup>8</sup>                        |

[3] J. M. Taylor et al., High-sensitivity diamond magnetometer with nanoscale resolution, Nature Physics, 4, 810-817 (2008).

[4] N. Arunkumar et al., Micron-Scale NV-NMR Spectroscopy with Signal Amplification by Reversible Exchange, PRX Quantum, 2, 010305 (2021).

[5] T. Häberle et al., Nanoscale nuclear magnetic imaging with chemical contrast, Nature Nanotechnology, 10(2), 125-128 (2015).

[6] D. R. Glenn et al., High-resolution magnetic resonance spectroscopy using a solid-state spin sensor, Nature, 555, 351-354 (2018).

[7] J. M. Boss et al., Quantum sensing with arbitrary frequency resolution, Science, 356, 837-840 (2017).

[8] K. Arai et al., Millimetre-scale magnetocardiography of living rats with thoracotomy, Communications Physics, 5, 200 (2022).

[9] Z. Yu et al., Noninvasive magnetocardiography of a living rat based on a diamond quantum sensor, Physical Review Applied, 21, 064028 (2024).

## □ 총괄/세부 1 과제

### ○ 최종목표(3단계) : 다이아몬드 NV 센터 기반 나노·마이크로 MRI 장치 개발

- 자기장 민감도: 5 nT/Hz<sup>0.5</sup> 이하 (단일큐비트), 30 nT·μm<sup>1.5</sup>/Hz<sup>0.5</sup> 이하 (소규모 큐비트)
- 공간분해능: 10 nm 이하 (단일큐비트), 500 nm 이하 (소규모큐비트)
- 주파수분해능: 1 ppm(part-per-million) 이하
- 이미징 장비 개발: 패키지된 상온 MRI 이미징 장비 초기 버전 제작
- MRI 측정 성능: 유사환경에서 나노·마이크로 NMR·MRI 성능 데모

- 2단계 목표 : 다이아몬드 NV 센터 기반 나노·마이크로 MRI 핵심기술 개발
  - 자기장 민감도:  $10 \text{ nT/Hz}^{0.5}$  이하 (단일큐비트),  $50 \text{ nT} \cdot \mu\text{m}^{1.5}/\text{Hz}^{0.5}$  이하 (소규모 큐비트)
  - 공간분해능:  $30 \text{ nm}$  이하 (단일큐비트),  $700 \text{ nm}$  이하 (소규모큐비트)
  - 주파수분해능:  $100 \text{ ppm}$  이하
  - NMR: 2종 이상의 핵스핀 구별 및 chemical shift 측정
  - MRI: 2차원 및 3차원 이미징 기술 개발
  - MRI 측정 성능: 실험실 환경에서 나노·마이크로 NMR·MRI 성능 데모

○ 단계별 목표

| 구분               | 단계별 연구목표   |
|------------------|--|
| 1단계<br>(‘25~’27) | 다이아몬드 NV 센터 기반 NMR·MRI 핵심 기술 개발<br>- NMR 신호 측정 양자센싱 기술 개발, NMR 신호 증폭 기술 개발<br>- 나노·마이크로 2차원 MRI 이미징 데모<br>- 2종 이상 핵스핀 주파수 구분 측정  |
| 2단계<br>(‘28~’29) | 다이아몬드 NV 센터 기반 나노·마이크로 NMR·MRI 이미징 데모<br>- NMR 신호 측정, 신호 증폭 기술 고도화<br>- 핵스핀 chemical shift 측정<br>- 성능 검증: 실험실 환경에서 나노·마이크로 MRI 이미징 데모<br>- 민감도, 분해능: $10 \text{ nT/Hz}^{0.5}$ , $30 \text{ nm}$ , $100 \text{ ppm}$ , (단일큐비트), $50 \text{ nT} \cdot \mu\text{m}^{1.5}/\text{Hz}^{0.5}$ , $700 \text{ nm}$ , $100 \text{ ppm}$ (소규모큐비트) |
| 3단계<br>(‘30~’32) | 바이오·의료분야 활용 가능한 나노·마이크로 MRI 이미징 장치 개발<br>- 패키지화된 MRI 이미징 장치 초기 버전 제작<br>- 성능 검증: 유사환경에서 나노·마이크로 MRI 이미징 데모<br>- 민감도, 분해능: $5 \text{ nT/Hz}^{0.5}$ , $10 \text{ nm}$ , $1 \text{ ppm}$ , (단일큐비트), $30 \text{ nT} \cdot \mu\text{m}^{1.5}/\text{Hz}^{0.5}$ , $500 \text{ nm}$ , $1 \text{ ppm}$ (소규모큐비트)                                 |

○ 정량적 연구개발 목표



| 성능지표 |                               | 단위   | 연구개발 목표치       |                     |   | 연구개발 전<br>국내 수준 | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관)                          |
|------|-------------------------------|--|----------------|---------------------|---|-----------------|--|
|      |                               |  | 1단계<br>(25~27) | 2단계<br>(28~29)      | 3단계<br>(30~32)                                    |                 |  |
| 1    | NMR 측정을 위한<br>자기장 민감도         | $nT/Hz^{0.5}$ (단일큐비트) /<br>$nT \cdot \mu m^{1.5}/Hz^{0.5}$<br>(소규모큐비트) | 30 /<br>100    | 10 /<br>50          | 5 / 30  | 50 / 100        | 18 / 34<br>(미국/하버드,<br>미국/메릴랜드) <sup>3,4</sup> |
| 2    | MRI 이미지를 위한<br>공간분해능          | nm/ $\mu m$  | 50 / 1         | 30 /<br>0.7         | 10 /<br>0.5                                       | 20-50 / 1       | 5 / 1<br>(독일/함부르크,<br>미국/메릴랜드) <sup>5,4</sup>  |
| 3    | NMR 측정을 위한<br>주파수분해능          | ppm  | 1000           | 100                 | 1   | 1000            | 1-10 (미국/하버드,<br>스위스/ETH) <sup>6,7</sup>       |
| 4    | (정성) MRI 이미징 장치<br>개발 및 성능 데모 | 정성   | -              | 실험실<br>환경에서<br>성능데모 | 이미징<br>장치<br>초기<br>버전<br>개발 및<br>유사환경<br>에서<br>데모 | 없음              | 실험실 수준에서<br>2차원 MRI 데모                         |

- [3] J. M. Taylor et al., High-sensitivity diamond magnetometer with nanoscale resolution, Nature Physics, 4, 810-817 (2008).
- [4] N. Arunkumar et al., Micron-Scale NV-NMR Spectroscopy with Signal Amplification by Reversible Exchange, PRX Quantum, 2, 010305 (2021).
- [5] T. Häberle et al., Nanoscale nuclear magnetic imaging with chemical contrast, Nature Nanotechnology, 10(2), 125-128 (2015).
- [6] D. R. Glenn et al., High-resolution magnetic resonance spectroscopy using a solid-state spin sensor, Nature, 555, 351-354 (2018).
- [7] J. M. Boss et al., Quantum sensing with arbitrary frequency resolution, Science, 356, 837-840 (2017).

## 5. 연구내용

### □ 총괄과제

#### ○ 총괄과제 전체(1~3단계) 연구내용

##### (1) (총괄/세부1) 고감도 고분해능 양자 MRI 기술 개발

###### ① 자기장 민감도

- $5 nT/Hz^{0.5}$  이하(단일큐비트),  $30 nT \cdot \mu m^{1.5}/Hz^{0.5}$  이하(소규모큐비트) 민감도 확보
- NMR 신호 정밀 측정 및 신호 증폭 기술 고도화

###### ② 공간분해능

- 10 nm 이하 (단일큐비트), 500 nm 이하 (소규모큐비트) 분해능 확보
- 2·3차원 MRI 이미징 기술 고도화

###### ③ 주파수분해능

- 1 ppm(part-per-million) 이하 (예: 1 MHz 핵스핀 신호를 1 Hz 주파수 분해능으로 측정) 주파수 분해능 확보
- 주파수 분해능 기술 고도화 및 다종 핵스핀 이미징

④ MRI 이미징 장치 개발 및 성능 검증

- 바이오·의료 분야 적용 가능한 패키징된 MRI 이미징 장치 초기 버전 개발
- 유사환경 환경에서 나노·마이크로 NMR·MRI 성능 데모

(2) (세부2) 소형 자기장 센서 및 심자도 기술 개발

① 자기장 민감도

- 100 pT/Hz<sup>0.5</sup> 이하 자기장 민감도 확보
- 심자도 신호 정밀 측정 및 1 ms 이하의 심자도 pulse 신호 측정

② 생체친화형 소형 센서 제작

- 5 cm<sup>3</sup> 이하 (외부 패치형), 5 mm<sup>2</sup> 이하 (내부 삽입형) 크기 센서 제작
- 외부 측정용 비삽입·패치형, 내부 측정용 인체삽입·내시경형 소형 센서 개발

③ 심자도 측정 성능 검증

- 유사 환경에서 생체 테스트 샘플 기반 심자도 신호 측정 데모

o 총괄과제 1~2단계까지 연구내용

(1) (총괄/세부1) 고감도 고분해능 양자 MRI 기술 개발

① 자기장 민감도

- 10 nT/Hz<sup>0.5</sup> 이하(단일큐비트), 50 nT·μm<sup>1.5</sup>/Hz<sup>0.5</sup> 이하(소규모큐비트) 민감도 확보
- NMR 신호 정밀 측정 및 신호 증폭 기술 개발

② 공간분해능 및 나노·마이크로미터 이미징 기술 개발

- 30 nm 이하 (단일큐비트), 700 nm 이하 (소규모큐비트) 분해능 확보
- 다이아몬드·광구조체 공정 및 측정 효율 향상 기술 개발
- Scanning magnetometry, wide-field microscopy 이미징 기술 개발 등

③ 주파수분해능

- 100 ppm 이하 주파수 분해능 확보
- 핵스핀 chemical shift 측정 및 주파수 변화 정밀 측정 기술 개발

④ MRI 이미징 성능 검증

- 실험실 환경에서 나노·마이크로 NMR·MRI 성능 데모

(2) (세부2) 소형 자기장 센서 및 심자도 기술 개발

① 자기장 민감도

- 300 pT/Hz<sup>0.5</sup> 이하 자기장 민감도 확보
- 정밀 AC 자기장 센싱 및 5 ms 이하의 pulse 신호 측정 기술 개발
- 고품질 양상블 NV 센터 생성, 스핀 잡음 제어, 광신호 증폭 기술 개발

② 소형 센서 기술 개발

- 10 cm<sup>3</sup> 이하 (외부 패치형), 10 mm<sup>2</sup> 이하 (내부 삽입형) 크기 확보

- 광·마이크로파 제어부, 다이아몬드 센서부, 광섬유 등 integrated 소자 개발
- ③ 심자도 측정 성능 검증
- 실험실 환경에서 심자도 신호 모사 데모

## □ 총괄/세부1 과제

### ○ 세부1과제 전체(1~3단계) 연구내용

#### ① 자기장 민감도 및 NMR 측정 기술 고도화

- $5 \text{ nT/Hz}^{0.5}$  이하 (단일큐비트),  $30 \text{ nT} \cdot \mu\text{m}^{1.5}/\text{Hz}^{0.5}$  이하 (소규모큐비트) 민감도 확보
- NMR 신호 정밀 측정을 위한 민감도, 결맞음, SNR 고도화
- NMR 신호 증폭 기술 고도화

#### ② 공간분해능 및 이미징 기술 고도화

- $10 \text{ nm}$  이하 (단일큐비트),  $500 \text{ nm}$  이하 (소규모큐비트) 분해능 확보
- 2·3차원 MRI 이미징 기술 고도화

#### ③ 주파수분해능 및 다중 핵스핀 분석 기술 고도화

- $1 \text{ ppm}$  이하 주파수 분해능 확보
- 주파수 분해능 기술 고도화 및 다중 핵스핀 이미징

#### ④ MRI 이미징 장치 개발 및 성능 검증

- 바이오·의료 분야 적용 가능한 패키지된 MRI 이미징 장치 초기 버전 개발
- 유사환경 환경에서 나노·마이크로 NMR·MRI 성능 데모

### ○ 세부1과제 1~2단계까지 연구내용

#### ① 자기장 민감도 및 NMR 측정 기술 개발

- $10 \text{ nT/Hz}^{0.5}$  이하 (단일큐비트),  $50 \text{ nT} \cdot \mu\text{m}^{1.5}/\text{Hz}^{0.5}$  이하 (소규모큐비트) 민감도 확보
- NMR 신호 정밀 측정을 위한 AC 자기장 센싱 기술 개발 (예: dressed-state sensing, correlation measurements 등)
- NMR 신호 증폭 기술 개발 (예: DNP(dynamical nuclear polarization), hyperpolarization, SABRE(reversible exchange) 등)

#### ② 공간분해능 및 나노·마이크로미터 이미징 기술 개발

- $30 \text{ nm}$  이하 (단일큐비트),  $700 \text{ nm}$  이하 (소규모큐비트) 분해능 확보

- 다이아몬드 나노필라, 광구조체 등 공정 및 측정 효율 향상 기술 개발
- Scanning magnetometry, wide-field microscopy 이미징 기술 개발
- 자기장 공간분해능 고도화를 위한 super-resolution imaging 기술 개발
- 3차원 MRI 이미징을 위한 분석 기술 개발 (예: deep surface imaging, machine learning-aided imaging, (spatial) correlation imaging 등)

#### ③ 주파수분해능 및 다중 핵스핀 분석 기술 개발

- 100 ppm 이하 주파수 분해능 확보
- 2종 이상의 핵스핀들 구분 및 chemical shift 측정 기술 개발
- 주파수 변화 정밀 측정 기술 개발 (예: Qdyne(quantum heterodyne) detection, quantum memory-assisted sensing, synchronized or arbitrary frequency correlation sensing 등)

#### ④ MRI 이미징 성능 검증

- 실험실 환경에서 나노·마이크로 NMR·MRI 성능 데모

## 6. 기대 효과

### ○ 과학기술적 파급효과

- 나노 MRI는 미토콘드리아 같은 특정 부위를 나노미터 분해능으로 관찰이 가능해 생명현상의 보다 깊은 이해를 줄 수 있는 연구를 가능하게 함. 세포막을 구성하는 단백질의 3차원적 구조를 분자수준으로 매우 정밀하게 분석할 수 있어, 보다 정밀한 신약 개발 등에 필수적임
- 마이크로미터 수준의 공간분해능을 갖는 양자자기장 이미징 기술을 통해 세포의 성장 및 활성화 등을 보다 자세하게 관찰이 가능해짐

### ○ 경제적 파급효과

- 나노 MRI, 세포분석 및 이미징 기술의 경우 병리적인 진단을 자동화할 수 있고 보다 신속하고 저렴한 병리학 진단의 기반이 될 수 있음. 새로운 바이오·의료 진단 장비의 개발로 국제 시장 경쟁력 확보
- 현재 글로벌 양자센서 산업은 초기 성장 단계로, 양자자기장 센서 기술을 선제적으로 확보할 경우, 국내 산업계는 고감도·고해상도 정밀 계측 시장에서 기술적 우위를 선점할 수 있음

### ○ 사회적 기대효과

- 양자센서를 기반으로 하는 보다 정밀한 진단기술을 바탕으로, 질병의 조기진단을 구현 건강한 사회를 구축 할 수 있음. 의료진단 기술의 고도화로 삶의 질 향상 및

고령화에 의한 사회비용 감소 효과 기대

## 7. 지원기간/예산/추진체계

○ 연구개발기간 : 8년 이내

○ 정부지원연구개발비 : '25년 10.3억원 이내

- 1~2단계까지 정부지원연구개발비 74.93억원 이내

- 3단계까지 총 정부지원연구개발비 140.99억원 이내

※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  |     | 기간             | 개월수  | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월  | 1,030백만원  |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월  | 1,681백만원  |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월 | 1,594백만원  |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월 | 1,594백만원  |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월 | 1,594백만원  |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월 | 2,344백만원  |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월 | 2,131백만원  |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월 | 2,131백만원  |
| 합계  |     | -              | 87개월 | 14,099백만원 |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

○ 주관기관 : 제한없음

- 1단계부터 산업계 참여 권고, (2단계~) 산업계 참여 필수

\* 2단계부터 산업계 참여가 필수이나 연구개발 수행 중에 포함하는 것을 허용, 다만 이 경우는 산업계 참여 계획을 반드시 포함하여 제시할 것(참여형태 : 주관/공동/위탁연구개발기관)

|               |   |                   |     |
|---------------|---|-------------------|-----|
| 연구유형          | 기초연구 (    ), 응용연구 ( √ ), 개발연구 (    )  | TRL ( 3 )~( 5 )단계 |     |
| 과제특징          | 경쟁형(    ), 경쟁형(챌린지)(    ), SW자산뱅크등록(    ), 공개SW(    ), 기술료비징수(    ), 국제협력R&D(    ), 정책지정(    ), 혁신도약형(○), 표준화연계(    ), 사회문제해결형(    ), 일자리연계(    ), 소재부품장비(    ), 규제샌드박스(    ), 연구데이터공개(    ), 사업화연계(    ), IP-R&D연계(    ) |                   |     |
| 구분            |   | 기술분야명/팀명          | 성명  |
| 책임PM(과제기획위원장) |   | 양자 PM             | 오윤제 |
| 담당 팀장         |   | 양자기술·산업팀          | 이민경 |

|           |   |                    |
|-----------|---|--------------------|
| 관리번호      | 2025-양자센싱-5   | (지정공모형, 병렬형 총괄/세부) |
| 기술분류      | 대분류(양자)-중분류(양자센싱)-소분류(양자전·자기장센싱)-세분류(양자자기장센싱)       |                    |
| 중점분야      | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( ) |                    |
| 기획유형      | 파괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )      |                    |
| 총괄<br>과제명 | 다이아몬드 NV 센터 기반 고감도 고분해능 양자 MRI, 심자도 기술 개발           |                    |
| 세부<br>과제명 | (세부 2) 앙상블 NV 센터 기반 소형 자기장센서 및 심자도 기술 개발            |                    |

## 1. 개요

- 생체 친화적이고 고감도 자기장 센싱과 소형화가 가능한 앙상블 NV 센터를 기반으로 한 심자도 신호 측정 핵심응용기술을 개발함
- 밀리미터 수준의 앙상블 NV 센터 기반 소형 자기장 센서를 개발하고, 실험실 환경 및 나아가 의료분야 활용 가능한 유사환경에서 성능을 데모함

## 2. 현황 및 필요성

- (기존 기술현황)
  - (통합형 총괄) Hall, electric coils, SQUID 기반의 기존 자기장 센싱 기술은 MRI, 심자도·뇌자도, 바이오마커 등 다양한 바이오·의료 분야에서 활발히 사용되고 있는 중요한 기술임. 하지만, 나노·마이크로미터 수준의 NMR·MRI, 분자 수준의 세포·단백질 구조 분석, 극미량의 바이러스 신속 검출, 미세 국소 질병 조기 발견 등이 가능하기 위해서는 현재의 수 밀리미터 수준의 해상도, 마이크로 테슬라 수준의 민감도, 극저온 구동 환경 등의 한계점을 극복하고 나아가 실제 바이오·의료 현장에 적용 가능한 핵심응용 및 센서 개발 기술을 확보해야 함[1]
  - (세부2) 기존 SQUID 기반의 심자도 신호 측정은 극저온 구동 환경과 고정형이라는 한계가 있고 OPM 기반의 심자도 센서는 고감도 측정이 가능하나 외부 자기장 차폐가 필요하고 밀리미터 이하의 소형화 기술 개발이 필요함. 특히 기존 현미경 기반의 양자 자기장 검출 방식은 고체 시료나 생체 표본 검사에는 적합하나, 사람의 인체 등 의료 진단 목적으로는 활용이 어려움. 따라서, 생체 친화적이고 소형화 고감도 센싱이 가능한 앙상블 NV 센터 기반의 차세대 양자자기장 센서를 개발하여 이러한 한계점을 극복하고, 실제 의료 현장에 적용 가능한 실온·생체 환경 구동, 소형·인체삽입형 핵심응용 및 센서 개발 기술을 확보해야 함

[1] 사례: 하버드대에서 spin-off한 미국 QDTI사의 경우, 실험실 차원의 NV 센터 기반 바이오 양자센싱

기술을 제품으로 개발하기 위해 10년 가까운 응용기술 개발 과정이 필요했음 (2013-2022).  
<https://qdti.com/>

○ (필요성)

- (통합형 총괄) 다이아몬드 NV 센터는 상온 생체환경에서 비침습적이고 무독성적인 방법으로 미세 신호 측정 및 분석이 가능하기 때문에, 바이오·의료분야에서 차세대 정밀센서로 활용될 수 있는 대표적인 양자자기장 센서 플랫폼임. 단일 큐비트 수준에서는 나노·마이크로미터 수준의 고해상도, 나노테슬라 수준의 고감도가 가능하고, 앙상블 큐비트 수준에서는 밀리미터 수준의 소형 센서, 피코테슬라 수준의 고감도 센싱이 가능함[2]. 따라서, 본 과제에서는 NV 센터 기반 양자자기장 센싱 및 이미징 핵심응용기술을 고도화하고, 나아가 나노·마이크로 MRI, 소형 심자도 등의 센서로 발전시켜 바이오·의료 분야에 활용 가능하도록 지원할 필요가 있음
- (세부2) 다이아몬드 앙상블 NV 센터는 피코테슬라 수준의 고감도를 유지하면서도 상온 생체환경에서 동작이 가능하고 밀리미터 수준의 소형화가 가능하기 때문에, 심장 질병 조기 진단 및 검출 등 의료 분야에 활용될 수 있는 높은 잠재력을 갖고 있음. 이러한 기술이 실제 의료 현장과 같은 곳에서 활용될 수 있기 위해서는 다이아몬드 스핀 센싱 기술 확보와 함께 광·마이크로파 신호 등이 별도의 광정렬 없이 안정적, 고효율 집적되어있는 플랫폼 개발이 필수적임. 따라서, 본 세부과제에서는 앙상블 NV 센터 기반 양자자기장 센싱 및 심자도 신호 측정에 필요한 핵심응용기술을 개발하고, 나아가 소형·인체삽입형 심자도 센서로 발전시켜 향후 의료 분야에 활용 가능하도록 지원할 필요가 있음

[2] N. Aslam et al., Quantum sensors for biomedical applications, Nature Review Physics, 5, 157-169 (2023).

### 3. 수요분석

○ (주요 수요처)

- 국내외 의료기관, 의료장비 업체, 센서 기업 등 소형 고성능 양자자기장 센서 활용 및 제작 관련 기관들과 기업들이 주요 수요처로 예상됨

○ (협력방안)

- (총괄/세부1) “다이아몬드 NV 센터 기반 고감도 고분해능 양자 MRI 기술 개발” 과제와 협력을 통해, 다이아몬드 공정, NV 센터 생성, 광구조제 제작, 자기장 센싱 공통 프로토콜 등 공동 개발
- 양자플래그십 내 ‘고체 점결함 양자얽힘 큐비트쌍 기반 고전 한계 극복 양자센싱 핵심기술 개발’ 과제와의 기술 연계 및 협력 연구를 통하여, 고도화된 양자센싱 기술이 의료 분야 응용에 접목될 수 있도록 협력 방안 모색 필요(2단계 후반 및 3단계). 양자플래그십 과제 간 상호 기술 워크숍 및 공동 개발 프로그램 운영을

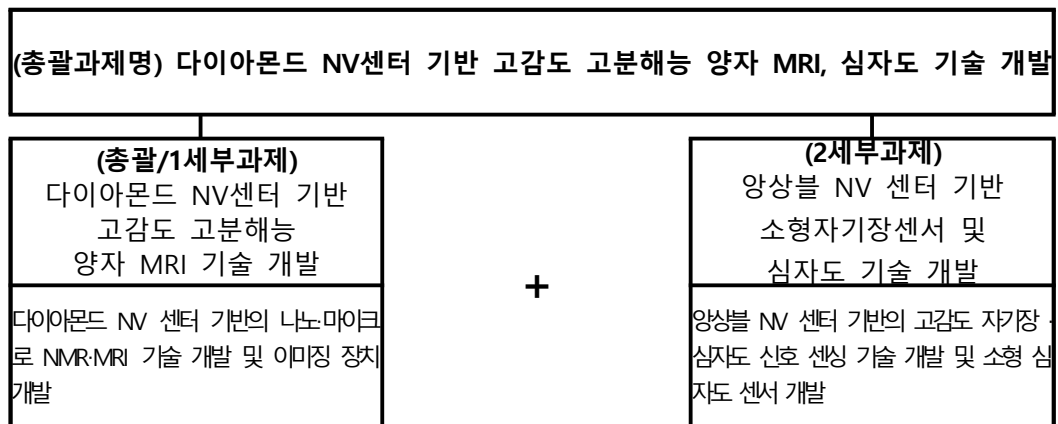
통한 연구 시너지 창출을 꾀할 수 있음

- 의료 기관이나 의료 장비 및 센서를 개발하는 국내 관련 기관과 기업이 과제에 참여하거나 협력하는 방안이 필요함

#### 4. 연구목표

- o 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- o 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
  - 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원
- o 본 RFP는 통합형 총괄-세부과제 유형으로 세부2 과제에 해당함

##### <통합형 총괄-세부 과제 구성도>



##### o 세부2과제 최종목표(3단계) : 양상블 NV 센터 기반 소형 심자도 개발

- 자기장 민감도:  $100 \text{ pT/Hz}^{0.5}$  이하
- 펄스 신호 측정 가능한 시간 분해능:  $1 \text{ ms}$  이하
- 소형 센서 크기 (센서 헤드):  $5 \text{ cm}^3$  이하 (외부 패치형),  $5 \text{ mm}^2$  이하 (내부 삽입형)
- 소형 센서: 외부 측정용 비삽입·패치형, 내부 측정용 삽입·내시경형 소형 센서 개발
- 심자도 측정 성능: 유사환경에서 심자도 신호 측정 데모

##### o 세부2과제 2단계 목표 : 양상블 NV 센터 기반 심자도 신호 측정 기술 개발

- 자기장 민감도:  $300 \text{ pT/Hz}^{0.5}$  이하
- 펄스 신호 측정 가능한 시간 분해능:  $5 \text{ ms}$  이하
- 소형 센서 크기 (센서 헤드):  $10 \text{ cm}^3$  이하 (외부 패치형),  $10 \text{ mm}^2$  이하 (내부 삽입형)
- 심자도 측정 성능: 실험실 환경에서 심자도 신호 모사 데모



○ 세부2과제 단계별 목표

| 구분               | 단계별 연구목표  |
|------------------|---|
| 1단계<br>(‘25~’27) | 양상블 NV 센터 기반 펄스 자기장 신호 측정 기술 개발<br>- 양상블 기반 자기장 민감도, 결맞음 향상 및 잡음 제어 기술 개발<br>- 자기장 펄스 신호 측정 기술 개발<br>- 외부 측정용 비삽입·패치형 소형 센서 개발<br>- 전류회로 테스트 샘플 기반 유사 심자도 신호 테스트 진행   |
| 2단계<br>(‘28~’29) | 양상블 NV 센터 기반 심자도 측정 기술 개발 및 테스트 실험 진행<br>- 소형 센서 내 자기장 민감도, 펄스 시간 분해능 고도화 기술 개발<br>- 광섬유·내시경과 결합된 내부 측정용 삽입형 소형 센서 개발<br>- 성능 검증: 실험실 환경에서 생체 테스트 샘플 기반 심자도 신호 측정 데모<br>- 민감도, 센서 크기: 300 pT/Hz <sup>0.5</sup> , 10 cm <sup>3</sup> (외부 패치형)/10 mm <sup>2</sup> (내시경 삽입형) |
| 3단계<br>(‘30~’32) | 의료분야 활용 가능한 소형 심자도 장치 개발<br>- 소형 심자도 센서 초기 버전 제작<br>- 성능 검증: 유사 환경에서 생체 테스트 샘플 기반 심자도 신호 측정 데모<br>- 민감도, 센서 크기: 100 pT/Hz <sup>0.5</sup> , 5 cm <sup>3</sup> (외부 패치형)/5 mm <sup>2</sup> (내시경 삽입형)   |

○ 세부2과제 정량적 연구개발목표

| 성능지표 |                              | 단위                                   | 연구개발 목표치       |                |                | 연구개발 전<br>국내 수준 | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관)            |
|------|------------------------------|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------------------------|
|      |                              |                                      | 1단계<br>(25~27) | 2단계<br>(28~29) | 3단계<br>(30~32) |                 |                                  |
| 1    | 심자도 신호 측정을 위한<br>자기장 민감도     | pT<br>/Hz <sup>0.5</sup>             | 1000           | 300            | 100            | 1000            | 140 (일본/동경대) <sup>3</sup>        |
| 2    | 펄스 신호 측정 가능한 시간<br>분해능       | ms                                   | 10             | 5              | 1              | 100             | 15 (중국/USTC) <sup>4</sup>        |
| 3    | 소형 센서 크기 (외부<br>패치형/내시경 삽입형) | cm <sup>3</sup><br>/ mm <sup>2</sup> | 100 /<br>100   | 10 /<br>10     | 5 / 5          | 100 / -         | 100<br>(일본/동경대) <sup>3</sup> / - |
| 4    | 심자도 신호 측정                    | SNR                                  | -              | 3              | 10             | -               | 8 (일본/동경대) <sup>3</sup>          |

[3] K. Arai et al., Millimetre-scale magnetocardiography of living rats with thoracotomy, Communications Physics, 5, 200 (2022).

[4] Z. Yu et al., Noninvasive magnetocardiography of a living rat based on a diamond quantum sensor, Physical Review Applied, 21, 064028 (2024).

5. 연구내용

○ 세부2과제 전체(1~3단계) 연구내용

① 자기장 민감도 고도화 및 심자도 신호 측정 기술 개발

- 100 pT/Hz<sup>0.5</sup> 이하 자기장 민감도 확보
- 1 ms 이하의 pulse 신호 측정
- 심자도 신호 정밀 측정을 위한 AC 자기장 민감도, 결맞음, SNR, 광신호 고도화

② 생체친화형 소형 센서 개발

- 센서 헤드 기준  $5\text{ cm}^3$  이하 (외부 패치형),  $5\text{ mm}^2$  이하 (내부 삽입형) 크기 센서 제작
- 외부 측정용 비삽입·패치형 소형 센서 개발
- 내부 측정용 인체삽입·내시경(endoscope)형 소형 센서 개발

③ 심자도 측정 성능 검증

- 유사 환경에서 생체 테스트 샘플 기반 심자도 신호 측정 데모

o 세부2과제 1~2단계까지 연구내용

① 자기장 민감도 고도화 및 심자도 신호 측정 기술 개발

- $300\text{ pT/Hz}^{0.5}$  이하 자기장 민감도 확보
- $5\text{ ms}$  수준의 pulse 신호 측정 기술 개발
- 심자도 신호 정밀 측정을 위한 저주파수 ( $1\text{ kHz}$  이하) 대역 AC 자기장 센싱 기술 개발 (예: lock-in assisted sensing, three-tone ODMR spectroscopy 등)
- 고품질·고밀도 양상블 NV 센터 생성 및 주변 스핀 잡음 제어 기술 개발
- 광신호 증폭을 위한 광학구조체 (예: bullseye, meta-lens 등) 제작

② 생체친화형 소형 센서 개발

- 센서 헤드 기준  $10\text{ cm}^3$  이하(외부 패치형),  $10\text{ mm}^2$  이하(내부 삽입형) 크기 확보
- 광·마이크로파 제어부, 다이아몬드 센서부, 광섬유 등 integrated 센서 소자 개발

③ 심자도 측정 성능 검증

- 실험실 환경에서 심자도 신호 모사 데모

6. 기대 효과

o 과학기술적 파급효과

- 심장에서 발생하는 극소량의 자기장을 측정할 수 있는 양자자기장 센서 개발을 통해, 심장질환 등의 보다 정밀한 진단이 가능하게 됨

o 경제적 파급효과

- 심자도 측정은 기존 센서로 구현할 수 없는 새로운 개념의 양자자기장센서 기반 진단 장비로, 대한민국이 새로운 의료 진단 장비의 개발로 국제시장 경쟁력 확보

및 신 의료기기 시장을 개척하는 기회가 될 수 있음

- 현재 글로벌 양자센서 산업은 초기 성장 단계로, 양자자기장 센서 기술을 선제적으로 확보할 경우, 국내 산업계는 고감도·고해상도 정밀 계측 시장에서 기술적 우위를 선점할 수 있음

○ 사회적 기대효과

- 양자센서를 기반으로 하는 보다 정밀한 진단기술을 바탕으로, 질병의 조기진단을 구현 건강한 사회를 구축 할 수 있고 의료진단 기술의 고도화로 삶의 질 향상 및 고령화에 의한 사회비용 감소 효과 기대

## 7. 지원기간/예산/추진체계

○ 연구개발기간 : 8년 이내

○ 정부지원연구개발비 : '25년 5.67억원 이내

- 1~2단계까지 정부지원연구개발비 41.41억원 이내
- 3단계까지 총 정부지원연구개발비 78.11억원 이내

※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  | 기간  | 개월수            | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월       |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월       |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월      |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월      |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월      |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월      |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월      |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월      |
| 합계  | -   | 87개월           | 7,811백만원  |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

○ 주관기관 : 제한없음

- 1단계부터 산업계 참여 권고, (2단계~) 산업계 참여 필수

\* 2단계부터 산업계 참여가 필수이나 연구개발 수행 중에 포함하는 것을 허용, 다만 이 경우는 산업계 참여 계획을 반드시 포함하여 제시할 것(참여형태 : 주관/공동/위탁연구개발기관)

|      |   |               |
|------|---|---------------|
| 연구유형 | 기초연구 ( ), 응용연구 ( ○ ), 개발연구 ( )                        | TRL (3)~(5)단계 |
| 과제특징 | 경쟁형( ), 경쟁형(챌린지)( ), SW자산뱅크등록( ), 공개SW( ), 기술료비징수( ), |               |

|               | 국제협력R&D( ), 정책지정( ), 혁신도약형(○), 표준화연계( ), 사회문제해결형( ),<br>일자리연계( ), 소재부품장비( ), 규제샌드박스( ), 연구데이터공개( ), 사업화연계( ),<br>IP-R&D연계( ) |     |
|---------------|--|-----|
| 구분            | 기술분야명/팀명   | 성명  |
| 책임PM(과제기획위원장) | 양자 PM  | 오윤제 |
| 담당 팀장         | 양자기술·산업팀   | 이민경 |

|  |   |         |
|--|---|---------|
| 관리번호   | 2025-양자센싱-6   | (지정공모형) |
| 기술분류   | 대분류(양자)-중분류(양자센싱)-소분류(양자전·자기장센싱)-세분류(양자 자기장 센싱)     |         |
| 중점분야   | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( ) |         |
| 기획유형   | 파괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )      |         |
| 과제명  | 뇌자도 측정을 위한 원자 증기셀 기반 양자 자기장 센서 기술 개발                |         |
| 1. 개요  |   |         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 원자 증기셀 기반 양자 자기장 센서는 상온·저자장 환경에서 인체에 무해하게 고감도 자기장을 측정할 수 있는 비침습적 기술</li> <li>○ 원자 스핀의 양자 상태 변화를 이용하여 미세한 자기장 변화를 정밀하게 검출하며, 고해상도 뇌자도(MEG) 측정에 적합</li> <li>○ 본 기술은 기존 초전도 센서(SQUID) 대비 냉각 장치 없이 동작 가능해 소형화·저비용화가 가능</li> <li>○ 원자증기셀 기반의 핵심 센싱 모듈을 제작하고 이를 활용한 초기형 소형 뇌자도 센서를 구현하는 것</li> </ul>  |   |         |
| 2. 현황 및 필요성  |   |         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (기존 기술현황) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 뇌자도(MEG) 측정 기술은 주로 초전도 양자간섭계(SQUID)를 사용하며, 극저온 구동 환경이 필수적임</li> <li>- SQUID 기반 센서는 액체헬륨 냉각 장치가 필요해 설치·운영 비용이 높고 유지보수에 많은 비용과 노력이 필요함</li> <li>- 또한 기존 장치는 냉각기 등의 특성상 고정형이어서 착용형·휴대형 장치 개발에 제약이 있다는 단점을 가지고 있음</li> <li>- 국내에서는 상온 환경에서 의료용 뇌자도 측정이 가능한 고감도의 소자형태의 원자증기셀 기반 양자 자기장 센서 핵심 기술이 부재함</li> <li>- 미국, 유럽, 중국, 일본 등 자체적인 기술 확보와 함께 상용화를 위한 노력이 있으나, 국내에서는 의료 응용이 가능한 소자 수준의 고감도 센서 개발 역량이 아직 확보되지 않은 상태임</li> </ul> </li> </ul> |   |         |

○ (필요성)

- 원자증기셀 기반 양자 자기장 센서는 뇌활동에 따른 미세한 자기장 신호를 측정할 수 있을 만큼 높은 감도를 제공할 수 있음
- 상온에서 구동 가능하며 밀리미터 수준까지 소형화가 가능해 휴대성과 착용성이 뛰어나서 생체자기 측정 및 의료 진단 장비로 유망함
- 헬멧형 등 착용형(wearable) 장치로 구현할 수 있어 기존 SQUID 기반 뇌자도 센서를 대체할 잠재력이 큼
- 차세대 의료용 뇌자도 센서 기술로서 임상 환경에서의 활용 가능성이 높으며, 해외에서는 실제로 임상을 위한 다양한 연구가 진행 중에 있음
- 양자 자기장 센서 응용 기술 개발은 미래 국방 적용 센서 기술로 활용 될수 있음
- 이를 위해 원자증기셀 기반 양자자기장 센싱 핵심응용기술을 고도화하고 소형 뇌자도 센서로 발전시켜 의료 분야 적용을 지원할 필요가 있음

### 3. 수요분석

- (주요 수요처) 국내외 의료기관, 의료장비 업체, 센서 기업 등 소형 고성능 양자 자기장 센서 활용 및 제작 관련 기관들과 기업들이 주요 수요처로 예상됨
- (협력방안) 의료 기관이나 의료 장비 및 센서를 개발하는 국내 관련 기관과 기업이 과제에 참여하거나 협력하는 방안이 필요함

### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
- 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원

○ **최종목표(3단계) : 원자증기셀 소형 자기장센서 기반 뇌자도 측정 기술 개발**

- 자기장 민감도:  $5 \text{ fT/Hz}^{0.5}$  이하
- 소형 센서 크기:  $10 \text{ cm}^3$  이하 (레이저 광원, 원자증기셀, 검출기, 자기장 보상 코일 등 포함)
- 뇌자도 측정 성능: 5개 이상 어레이 활용 뇌자도 이미지 생성

○ **2단계 목표 : 뇌자도 측정위한 원자증기셀 소형 자기장센서 개발**

- 자기장 민감도:  $20 \text{ fT/Hz}^{0.5}$  이하
- 소형 센서 크기:  $10 \text{ cm}^3$  이하 (레이저 광원, 원자증기셀, 검출기, 자기장 보상 코일 등 포함)
- 뇌자도 측정 성능: 실험실 환경에서 뇌자도 신호 데모 (SNR 5 이상)

#### ○ 단계별 목표

| 구분  | 단계별 연구목표  |
|-----|---|
| 1단계 | 원자증기셀 자기장 민감도 $20 \text{ fT/Hz}^{0.5}$ 이하 구현 (소형 센서로 개발될 수 있는 $1 \text{ cm}^3$ 이하의 소형 원자 증기셀)         |
| 2단계 | 원자기반 양자자기장 소형 센서 크기 $10 \text{ cm}^3$ 이하 (민감도 $20 \text{ fT/Hz}^{0.5}$ )로 제작 및 뇌자도 신호 생성 및 SNR 5이상 구현 |
| 3단계 | 업그레이드 된 민감도 $5 \text{ fT/Hz}^{0.5}$ 개발된 원자기반 양자자기장 소형 센서를 활용하여 센서 어레이를 이용한 유사환경에서 뇌자도 이미지 생성          |

#### ○ 정량적 연구개발목표

| 성능지표 |  | 단위                   | 연구개발 목표치       |                |                | 연구개발 전<br>국내 수준 | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관) |
|------|--|----------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------------|
|      |  |                      | 1단계<br>(25~27) | 2단계<br>(28~29) | 3단계<br>(30~32) |                 |                       |
| 1    | 1 cm <sup>3</sup> 이하의 소형 원자 증기셀에서의 자기장 민감도 | fT/Hz <sup>0.5</sup> | 20             | 20             | 5              | 200             | 20<br>(Quspín/미국)     |
| 2    | 양자 자기장 소형 센서 크기                            | cm <sup>3</sup>      | -              | 10             | 10             | -               | 10<br>(Quspín/미국)     |
| 3    | 뇌자도 신호 측정                                  | SNR                  |                | 5              | 10※            | -               | 10<br>(Quspín/미국)     |

※ 개발된 양자 자기장 센서 5개 이상을 활용해서 뇌자도 이미징 구현

### 5. 연구내용

#### ○ 전체(1~3단계) 연구내용

##### ① 자기장 민감도: $5 \text{ fT/Hz}^{0.5}$ 이하

- 소형 센서로 개발될 수 있는  $1 \text{ cm}^3$  이하의 소형 원자 증기셀에서 구현한 자기장 민감도를 확보

##### ② 양자 자기장 소형 센서 크기 : $10 \text{ cm}^3$ 이하

- wearable device로 구현 가능하도록 소자 내부에 레이저 광원, 원자증기셀, 검출기, 자기장 보상 코일 등 포함된 소형 센서로 개발

##### ③ 뇌자도 측정 성능 검증

- 뇌자도 측정 성능: SNR 10이상 달성, 5개 이상 어레이 활용 뇌자도 3차원 이미지 생성

- 2단계부터 기업참여 유도. 3단계 개발 응용기술 기업 연계

#### o 1~2단계까지 연구내용

##### ① 자기장 민감도: 20 fT/Hz<sup>0.5</sup> 이하

- 소형 센서로 개발될 수 있는 1 cm<sup>3</sup> 이하의 소형 원자 증기셀에서 구현한 자기장 민감도를 확보

##### ② 양자 자기장 소형 센서 크기 : 10 cm<sup>3</sup> 이하

- wearable device로 구현 가능하도록 소자 내부에 레이저 광원, 원자증기셀, 검출기, 자기장 보상 코일 등 포함된 소형 센서로 개발

##### ③ 뇌자도 측정 성능 검증

- 뇌자도 측정 성능: 실험실 환경 SNR 5이상 달성
- 2단계부터 기업 참여 유도. 3단계 개발 응용기술 기업 연계

## 6. 기대 효과

- o 뇌에서 발생하는 극소량의 자기장을 측정할 수 있는 양자자기장 센서 개발을 통해, 뇌질환 등의 보다 정밀한 진단이 가능하게 됨
- o 뇌자도 측정은 기존 센서로 구현할 수 없는 새로운 개념의 양자자기장센서 기반 진단 장비로, 대한민국이 신 의료기기 시장을 개척하는 기회가 될 수 있음
- o 의료진단 기술의 고도화로 삶의 질 향상 및 고령화에 의한 사회비용 감소 효과 기대
- o 소형화된 센서로 웨어러블 뇌기능 모니터링 시스템 개발 가능하여, 일상생활 중 뇌전증 발작 예측 등 새로운 의료 서비스 창출 기대
- o 비침습적 실시간 뇌기능 매핑으로 뇌-컴퓨터 인터페이스(BCI) 기술 고도화
- o 국산 핵심 부품 기술 확보로 기존 OPM 수입 대체 효과 및 글로벌 MEG 시장 진출 기반 마련
- o 국방 분야 응용(잠수함 탐지, 지뢰 탐지) 및 지질 탐사 등 타 산업 파급효과로 양자센서 산업 생태계 조성

## 7. 지원기간/예산/추진체계

- o 연구개발기간 : 8년 이내
- o 정부지원연구개발비 : '25년 6.8억원 이내



- 1~2단계까지 정부지원연구개발비 49.71억원 이내
- 3단계까지 총 정부지원연구개발비 93.74억원 이내

※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  | 기간  | 개월수            | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월       |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월       |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월      |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월      |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월      |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월      |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월      |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월      |
| 합계  | -   | 87개월           | 9,374백만원  |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

○ 주관기관 : 제한없음

- 1단계부터 산업계 참여 권고, (2단계~) 산업계 참여 필수

\* 2단계부터 산업계 참여가 필수이나 연구개발 수행 중에 포함하는 것을 허용, 다만 이 경우는 산업계 참여 계획을 반드시 포함하여 제시할 것(참여형태 : 주관/공동/위탁연구개발기관)

|               |  |                   |
|---------------|--|-------------------|
| 연구유형          | 기초연구 ( ), 응용연구 ( ○ ), 개발연구 ( )   | TRL ( 3 )~( 5 )단계 |
| 과제특징          | 경쟁형( ), 경쟁형(챌린지)( ), SW자산뱅크등록( ), 공개SW( ), 기술료비징수( ), 국제협력R&D( ), 정책지정( ), 혁신도약형(○), 표준화연계( ), 사회문제해결형( ), 일자리연계( ), 소재부품장비( ), 규제샌드박스( ), 연구데이터공개( ), 사업화연계( ), IP-R&D연계( ) |                   |
| 구분            |  | 기술분야명/팀명          |
| 책임PM(과제기획위원장) |  | 양자 PM             |
| 담당 팀장         |  | 양자기술·산업팀          |
|               |  | 성명                |
|               |  | 오윤제               |
|               |  | 이민경               |

|  |   |  |         |
|--|---|--|---------|
| 관리번호   | 2025-양자센싱-7   |  | (지정공모형) |
| 기술분류   | 대분류(양자)-중분류(양자 센싱)-소분류(양자 전·자기장 센싱)-세분류(양자 전·자기장 이미징)     |  |         |
| 중점분야   | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(○), 메타버스( ), 사이버보안( )       |  |         |
| 기획유형   | 파괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D(○)              |  |         |
| 과제명  | 반도체 비파괴 검사를 위한 리드버그 원자 기반 THz 전기장 양자 센싱 및 고속 이미징 핵심 기술 개발 |  |         |
| 1. 개요  |   |  |         |
| <div><div>○ 리드버그 원자 기반 양자 전기장 센서는 원자의 특별한 양자 상태인 리드버그 상태를 활용하여 전기장을 매우 정밀하게 측정하는 전기장 양자 센서로 기존의 금속 안테나 기반 센서가 가진 한계를 뛰어넘어 고감도, 광대역 주파수 측정, 비접촉 방식 등의 장점을 제공하며 다양한 분야에 활용될 잠재력을 보유</div><div>○ HBM 등 반도체 내부 결함 검사를 위해서는 비파괴 측정 기술이 필요하나 기존의 반도체 검사 기술은 대부분 1) 접촉식으로 반도체에 데미지를 주거나, 2) 비파괴식의 경우 스캐닝 방식(초음파, X-선 등)의 느린 검사 속도로 인해 양산 라인 적용 시 생산성을 저해</div><div>○ 따라서 반도체 내부에 손상을 주지 않으면서 전체 면적을 실시간에 가깝게 검사할 수 있는 비접촉·비스캐닝 방식의 차세대 비파괴 검사 기술 개발이 시급</div><div>○ 영국 Durham대에서 리드버그 원자에 기반하여 고전 THz 이미징 카메라의 감도보다 100배 민감하고 3k frames/s 속도까지 이미징이 가능함을 보고하면서 양자 전기장 센서 기반 비파괴 검사의 가능성 확인</div><div>○ 연구 개요<ul style="list-style-type: none"><li>- THz 전기장 분포를 왜곡 없이 광학적으로 직접 검출 가능한 리드버그 원자 기반 초고감도 양자 전기장 센싱 및 고속 양자 이미징 원천기술 개발</li><li>- 양자 전기장 센서 고유의 특성을 활용하여 측정 환경의 노이즈에 영향을 받지 않는 내성 강한 이미징 기술 확보</li><li>- 개발된 원천기술을 HBM 등 반도체 내부의 미세 접합 불량이나 기포 등을 고속으로 이미징할 수 있는 고속·대면적 양자 이미징 시스템 개발에 적용</li></ul></div></div> |   |  |         |
| 2. 현황 및 필요성  |   |  |         |

#### ○ (기존 기술현황)

- 기존 비파괴 검사는 초음파 반사로 내부 공기층 결함을 이미징하거나 X-선 투과로 금속 구조를 확인하는 방식으로 진행
- 공정 중 웨이퍼 검사: 접촉식 방식의 소자 손상 및 정밀 분석을 위한 파괴 검사 의존으로 비파괴 인라인 적용에 한계 존재
- 검사 속도 및 적용: 패키징의 스캐닝 검사는 속도 병목을 유발하고 최종 전기 검사는 수개월의 시간 지연으로 인해 신속한 공정 적용이 어려움

예) 3D 패키지 내부 검사에 쓰이는 초음파나 X-선 현미경 등은 스캐닝 방식으로 인해 시간이 오래 걸려 전수 검사가 아닌 샘플링 검사에 의존

#### ○ (필요성)

- 기존 스캐닝 방식의 속도 한계 및 샘플링 검사에 대한 의존에서 벗어나 제품 수율과 신뢰도를 보장할 수 있는 새로운 고감도 THz 양자 전기장 센서에 기반한 비파괴 반도체 검사 기술의 혁신 필요
- 고속 이미징 기반의 전수 검사는 3D 패키징 공정의 수율과 품질을 극대화하여 반도체 산업의 글로벌 경쟁력 우위를 확보하기 위한 핵심 기술
- 차세대 3D 패키지 검사 기술을 선점하여 HBM 등 핵심 고부가가치 반도체 분야의 기술 리더십 및 초격차 유지
- 핵심 검사 기술 및 장비의 국산화를 통해 외산 의존도를 탈피하고 차세대 장비 산업을 육성하며 수출 동력을 확보

### 3. 수요분석

#### ○ (주요 수요처)

- 종합 반도체 기업(IDM), 후공정 전문 기업(OSAT), 반도체 검사 장비 기업 등이 예상되는 주요 수요처
- 반도체 제조사를 시작으로 최종 제품 기업을 거쳐, 전자 제품을 사용하는 일반 소비자까지 사회 전체로 이어지는 가치 사슬 존재

#### ○ (협력방안)

- (단기) 단계별 연구자와 수요처간의 컨소시엄 구성 등 협력을 확대함으로써 핵심 실제 양산 라인의 문제점, 샘플 제공, 필요 성능 요구 등을 통해 실제 문제 해결을 목표로 상용화 높은 기술개발을 추진
- (중장기) 반도체 기업 및 관련 장비 기업과의 전략적 파트너십 구축을 통해 생산 라인에 시제품 설치 후 실증을 위한 공동연구 수행 및 기술 라이선싱 추진

### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
  - 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원

○ **최종목표(3단계) : 반도체 진단을 위한 비파괴 고속 THz 이미징 리드버그 원자 기반 양자 전기장 원천기술 고도화**

- 리드버그 원자 기반의 THz 영역 (0.1 ~ 1 THz)의 광대역 고감도 양자 전기장 센서 (100 fW/Hz<sup>1/2</sup>)를 활용하여 고감도 양자 전기장 센서에 기반하여 고속 (>5k frames/s) 양자 이미징 기술 구현
- 반도체 진단을 위한 양자 전기장 센서 기술의 신뢰성 확보 및 응용 가능성 검증

○ **2단계 목표 : 반도체 진단을 위한 리드버그 원자 기반 양자 전기장 핵심 원천기술 개발**

- 리드버그 원자 기반의 THz 영역 (0.1 ~ 0.5 THz)의 고감도 양자 전기장 센서 개발
- 고감도 양자 전기장 센서 (200 fW/Hz<sup>1/2</sup>)에 기반하여 고속 (>3k frames/s) 양자 이미징 기술 구현

○ **단계별 목표**

| 구분  | 단계별 연구목표  |
|-----|---|
| 1단계 | 리드버그 원자 기반 양자 전기장 센서 기반 비파괴 고속 양자 센서 기초 원천기술 확보 |
| 2단계 | 반도체 정밀 진단을 위한 THz 고속 양자 이미징 핵심 기술 개발            |
| 3단계 | 반도체 진단을 위한 정밀진단 기술의 신뢰성 확보 및 응용 가능성 검증          |

○ **정량적 연구개발목표**

| 성능지표 |              | 단위                   | 연구개발 목표치       |                |                | 연구개발 전<br>국내 수준 | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관)                               |
|------|--------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---|
|      |              |                      | 1단계<br>(25~27) | 2단계<br>(28~29) | 3단계<br>(30~32) |                 |   |
| 1    | 전기장 이미징 감도   | fW/Hz <sup>1/2</sup> | 1000           | 200            | 100            | -               | 200 fW/Hz <sup>1/2</sup> @ 0.55 THz<br>(영국/Durham대) |
| 2    | 전기장 이미징 속도   | k frames/sec         | 0.1            | 3              | 5              | -               | 3k<br>(영국/Durham대)                                  |
| 3    | 전기장 주파수 대역폭  | THz                  | 0.1            | 0.1~0.5        | 0.1~1          | 0.01~0.1        | 0.55 GHz, 1 THz<br>(영국/Durham대)                     |
| 4    | 전기장 이미징 픽셀 수 | 만개                   | 3              | 6              | 6              | -               | 6<br>(영국/Durham대)                                   |

## 5. 연구내용

### o 전체(1~3단계) 연구내용

- ① 리드버그 원자 기반의 THz 영역의 고감도 양자 전기장 센서 개발
  - 양자 전기장 이미징 센서 ( $100 \text{ fW/Hz}^{1/2}$ ) 개발
- ② 고속 양자 이미징 기술 개발
  - 고감도 양자 전기장 센서 기반 고속 ( $>5\text{k frames/s}$ ) 양자 이미징 기술 구현
- ③ 광대역 양자 이미징 기술 개발
  - 리드버그 원자 기반 광대역 THz ( $0.1 \sim 1.0 \text{ THz}$ ) 고감도 양자 전기장 센서 개발
- ④ 광대역 양자 이미징 기술 고도화
  - THz-광 변환 기술을 이용한 높은 전기장 이미징 픽셀 수 (6만개 픽셀) 확보

### o 1~2단계까지 연구내용

- ① 리드버그 원자 기반의 THz 영역의 고감도 양자 전기장 센서 개발
  - 양자 전기장 이미징 센서 ( $200 \text{ fW/Hz}^{1/2}$ ) 개발
- ② 고속 양자 이미징 기술 개발
  - 고감도 양자 전기장 센서 기반 고속 ( $>3\text{k frames/s}$ ) 양자 이미징 기술 구현
- ③ 광대역 양자 이미징 기술 개발
  - 리드버그 원자 기반 광대역 THz ( $0.1 \sim 0.5 \text{ THz}$ ) 고감도 양자 전기장 센서 개발
- ④ 광역 양자 이미징 기술 고도화
  - THz-광 변환 기술을 이용한 높은 전기장 이미징 픽셀 수 (6만개 픽셀) 확보

## 6. 기대 효과

### o 경제적 파급효과

- (반도체 산업) HBM 등 고부가가치 반도체 제품의 수출 향상 및 불량 비용 감소로 국내 반도체 제조사의 수익성 및 글로벌 시장 경쟁력 강화
- (장비 산업) 차세대 검사 장비의 국산화 및 상용화를 통해 외산 장비 의존도를 낮추고 새로운 고부가가치 수출 시장을 창출하여 국내 장비 산업 생태계 강화
- (전방 산업) 고신뢰성·고성능 반도체의 안정적 공급을 통해 AI, 데이터센터, 자율주행 등 미래 핵심 산업의 성장을 촉진하고 관련 시장 확대에 기여

### o 사회적 파급효과

- (기술 발전 가속화) AI, 빅데이터, IoT 등 4차 산업혁명 핵심 기술의 기반이 되는 고성능 반도체의 신뢰성을 확보하여 관련 기술 및 서비스의 발전과 보급을 가속화
- (고급 일자리 창출) 차세대 장비의 연구개발, 제조, 운용 등에 필요한 석·박사급의

- 전문 인력 수요를 창출하여 양질의 일자리 확대에 기여
- (기술 주권 확보) 국가 전략 자산인 반도체의 핵심 검사 기술을 내재화함으로써, 글로벌 공급망 위기 상황에서도 안정적인 생산 기반을 유지하고 국가 기술 주권 확보

## 7. 지원기간/예산/추진체계

○ 연구개발기간 : 8년 이내

○ 정부지원연구개발비 : '25년 6.35억원 이내

- 1~2단계까지 정부지원연구개발비 66.29억원 이내

- 3단계까지 총 정부지원연구개발비 123.11억원 이내

※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  |     | 기간             | 개월수  | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월  | 635백만원    |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월  | 1,341백만원  |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월 | 1,551백만원  |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월 | 1,551백만원  |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월 | 1,551백만원  |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월 | 1,894백만원  |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월 | 1,894백만원  |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월 | 1,894백만원  |
| 합계  |     | -              | 87개월 | 12,311백만원 |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

○ 주관기관 : 제한없음

- 1단계부터 산업계 참여 권고, (2단계~) 산업계 참여 필수

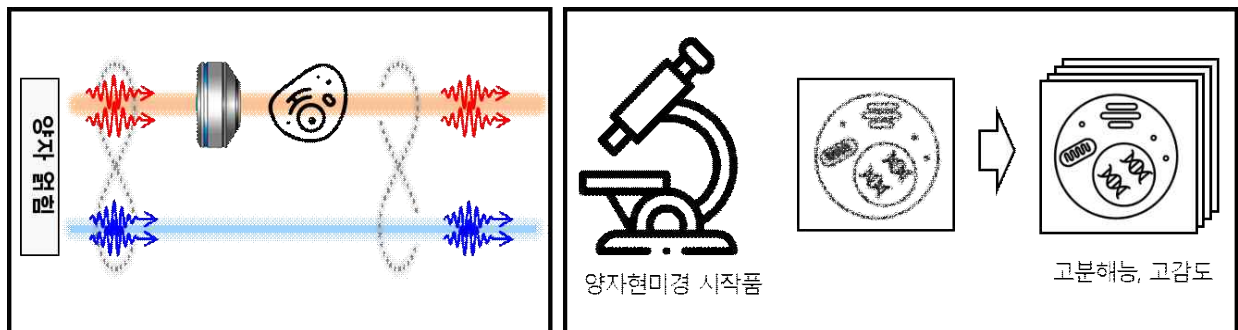
\* 2단계부터 산업계 참여가 필수이나 연구개발 수행 중에 포함하는 것을 허용, 다만 이 경우는 산업계 참여 계획을 반드시 포함하여 제시할 것(참여형태 : 주관/공동/위탁연구개발기관)

| 연구유형          | 기초연구 ( ), 응용연구 ( ○ ), 개발연구 ( )   | TRL ( 2 )~( 4 )단계 |
|---------------|--|-------------------|
| 과제특징          | 경쟁형( ), 경쟁형(챌린지)( ), SW자산뱅크등록( ), 공개SW( ), 기술료비징수( ), 국제협력R&D( ), 정책지정( ), 혁신도약형( ○ ), 표준화연계( ), 사회문제해결형( ), 일자리연계( ), 소재부품장비( ), 규제샌드박스( ), 연구데이터공개( ), 사업화연계( ), IP-R&D연계( ) |                   |
| 구분            | 기술분야명/팀명   | 성명                |
| 책임PM(과제기획위원장) | 양자 PM  | 오윤제               |
| 담당 팀장         | 양자기술·산업팀   | 이민경               |

|      |   |         |
|------|---|---------|
| 관리번호 | 2025-양자센싱-8   | (지정공모형) |
| 기술분류 | 대분류(양자)-중분류(양자 센싱)-소분류(양자 광 센싱)-세분류(양자현미경)          |         |
| 중점분야 | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( ) |         |
| 기획유형 | 파괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )      |         |
| 과제명  | 고분해능, 고감도 양자 현미경 시스템 기술 개발                          |         |

## 1. 개요

- (개념) 양자광(얽힘/간섭)을 이용해 고전 광학 한계를 뛰어 넘는 고분해능, 고감도 영상을 구현하는 양자 현미경 플랫폼을 개발하고 바이오 이미징을 실증
- 양자광을 이용해 고분해능, 고감도 이미징을 구현하는 양자 이미징 구현 및 바이오 이미징 활용 가능
  - 양자 광원 소형화 모듈 및 양자 현미경 시제품 개발 및 시제품을 활용하여 바이오 시편 환경에서 양자 이미징 우수성 구현 및 시스템 검증



<양자 현미경 시스템 개념도>

## 2. 현황 및 필요성

- (기존 기술현황)
  - 생체·고분자 시편은 고배율 이미징시 단일 면적에 집광되는 광량이 높아 광손상 및 변형 되는 문제점이 존재하고, 저광량에서는 샷-노이즈 감도 한계 등이 존재함\*
  - \* 기존 바이오 이미징은 형광·공초점·흡수·광결맞음단층이미징 등 고전 광학 체계가 주류인데, 고감도 이미징, 노이즈 저감을 위해 강한 조사광이나 장시간 적분을 사용함.
  - 기존 광학 현미경 및 이미징 시스템은 고전 광학적 Rayleigh 한계인 분해능 한계가 존재함
  - 양자 얽힘광을 이용한 양자 이미징 기술은 고전적 한계 이상의 분해능을 갖는 고분해능 이미징 또는 감도 한계 이하의 고감도 이미징이 가능하지만[Nat. Communications 14, 2441 (2023)] 세계적으로 실험실에서 시연 수준에 있는 상황

○ (필요성)

- 바이오 이미징 현장에서 광손상 및 변형을 최소화하며 낮은 광량에서 고감도 이미징 확보하려면 고감도 이미징 기술이 요구되며, 고전 광학적 한계 이상의 고분해능 이미징 구현을 위해 양자광을 이용한 양자 현미경 및 양자 이미징 기술 개발이 필요함.
- 양자 이미징의 실용적 구현 및 활용 확장을 위해서 양자 광원 소형화, 양자 이미징 시스템의 모듈화, 양자현미경 시제품 구현 등 양자 이미징 실용성 향상 필요
- 양자 센싱 및 이미징 시장은 2024년 10,042 억원 수준에서 2031년 20,755억원으로 성장 예상 [Mind Commerce (2024), McKinsey (2024), 양자정보기술백서 2024]
- 전세계적으로 양자 광학 센싱 및 이미징 기술 개발은 양자 이득을 고도화하는 개념 구현 연구와 동시에 실험실 수준에 검증된 기술을 공학적 실증 단계로 이동하는 연구가 동시에 진행중임. 즉, 양자 광학 이미징 기술의 산학 협력을 통해 시작품 개발과 바이오 이미징 검증 확보가 필요함

### 3. 수요분석

○ (주요 수요처)

- 병원 · 의생명(안과/피부/치과 · 전임상센터). 바이오 · 제약: 저광량 고감도 및 고분해능 영상, 단층 영상, 라벨-프리 라이브셀 영상 등
- (수요처 확장) 산업/문화재: 저손상 표면/막 구조 분석

○ (협력방안)

- 병원 및 바이오 · 제약, 기존 광학 이미징 업체 수요 반영 및 검증 협력

### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통합합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
- 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원

○ 최종목표(3단계) : 기존 고전적 광학 분해능 이상의 고분해능, 고감도 이미징이 가능한 소형 양자 현미경 플랫폼 개발

- 고분해능 양자 이미징 구현 기술 (기존 이미징 대비 4배 이상)



- 양자 이미징 품질 향상(Contrast-to-noise ratio 15배 이상, Signal-to-noise ratio 1.6배 이상 등) 기술 개발
- 양자 이미징 데이터 처리 소프트웨어 개발
- 고전 현미경 제품 크기 수준의 소형 양자 현미경 시제품 1건 이상.
- 양자 현미경 시제품 기반 양자 이미징 적용 사례 시연

○ 2단계 목표 : 고분해능, 고감도 양자 현미경 이미징 기술 개발

- 고분해능 양자 이미징 구현 기술 (기존 이미징 대비 2배 이상)
- 양자 이미징 품질 향상(Contrast-to-noise ratio 10배 이상, Signal-to-noise ratio 1.4배 이상 등) 기술 개발
- 양자 이미징 데이터 처리 소프트웨어 개발
- 양자 현미경 이미징 시제품 개발

○ 단계별 목표

| 구분               | 단계별 연구목표  |
|------------------|---|
| 1단계<br>(‘25~’27) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 양자 얽힘 광원 생성 및 측정 기술</li> <li>- 양자광 기반 회절 한계 이상의 고분해능 양자 현미경 구현</li> <li>- 양자광 기반 이미징 품질 향상 기술 개발</li> </ul>            |
| 2단계<br>(‘28~’29) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 양자 광원 모듈 개발</li> <li>- 고분해능, 고감도 양자 이미징 시스템 개발</li> <li>- 테이블탑 수준 양자 현미경 시제품 개발 및 이미징 특성 향상 검증</li> </ul>              |
| 3단계<br>(‘30~’32) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 양자 현미경 분해능, 감도 고도화</li> <li>- 상용화 양자 광원 제품 크기의 양자 광원 소형 모듈 개발</li> <li>- 양자 이미징 파장 대역 확장 및 라벨 프리 바이오 이미징 구현</li> </ul> |

○ 정량적 연구개발목표

| 성능지표 |                                   | 단위    | 연구개발 목표치       |                |                | 연구개발 전<br>국내 수준 | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관) |
|------|-----------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------------|
|      |                                   |       | 1단계<br>(25~27) | 2단계<br>(28~29) | 3단계<br>(30~32) |                 |                       |
| 1    | 양자 이미징 분해능 향상<br>(고전 광학 회절 한계 대비) | ratio | 2배             | 2배             | 4배             | -               | 2배<br>(미국 / Caltech)  |
| 2    | 이미징 대비도 향상<br>(고전 광학 이미징 대비)      | ratio | 5              | 10             | 15             | -               | 10배<br>(미국 / Caltech) |
| 3    | 이미징 시료 검증 사례*                     | 건     | -              | 1              | 2              | -               | -                     |

※ 위의 성능목표 외에도 정량적 성능지표 자율제시

\* 예시: 생체 시편, 프레파라트 시편, 금속 타겟 등

## 5. 연구내용

○ 전체(1~3단계) 연구내용

- ① 양자 얽힘 광원 기술 개발

- 얽힘 양자 광원 생성 및 측정 기술 개발
- 고효율 양자 광원 생성 및 양자 광원 모듈 소형화\* 기술 개발
  - \* 140 mm x 200 mm x 60 mm 크기 이하(직접 제작 양자 광원 모듈 기준)
- ② 고분해능, 고감도 양자 현미경 기술 개발
  - 양자광을 이용한 고전 광학적 회절 한계 이상의 고분해능(4배) 양자 이미징 구현 기술 개발
  - 양자광을 이용한 이미징 품질 향상 기술 개발
  - 양자 이미징 데이터 처리 소프트웨어 개발
- ③ 양자 이미징 시제품 개발
  - 고전 현미경 시제품과 유사한 크기의 양자 이미징 시제품 개발
  - 시제품을 이용한 고전 광원과 양자 광원의 이미징 품질 비교
    - \* 380 mm x 600 mm x 600 mm 크기 이하(직접 제작 현미경 시스템 기준)

#### o 1~2단계까지 연구내용

- ① 양자 얽힘 광원 기술 개발
  - 얽힘 양자 광원 생성 및 측정 기술 개발
  - 고효율 양자 광원 생성 및 양자 광원 모듈 제작 기술 개발
    - \* 280 mm x 400 mm x 120 mm 크기 이하(직접 제작 양자 광원 모듈 기준)
- ② 고분해능, 고감도 양자 현미경 기술 개발
  - 양자광을 이용한 고전 광학적 회절 한계 이상의 고분해능(2배) 양자 이미징 구현 기술 개발
  - 양자광을 이용한 이미징 품질 향상 기술 개발
  - 양자 이미징 데이터 처리 소프트웨어 개발
- ③ 양자 현미경 이미징 시제품 개발
  - 양자 현미경 시제품 개발
  - 시제품을 이용한 고전 광원과 양자 광원의 이미징 품질 비교 검증
    - \* 760 mm x 1,200 mm x 1,200 mm 크기 이하(직접 제작 현미경 시스템 기준)

## 6. 기대 효과

### o 과학기술적 파급효과

- 양자 광학 이미징 기술은 전세계적 양자 광학 센싱 연구 개발 방향에 위치하고 있으며, 차세대 산업에 직결된 핵심 기술로 양자 센서 기술의 국내 원천 기술 확보 및 양자 이미징 시제품 국산화 개발 등 양자 기술의 국가적 독립성 확보

### o 경제적 파급효과

- 고감도 및 고해상도 이미징을 필요로 하는 의료 분야, 제약 제조 분야 등에 고부가가치 시장 창출이 기대되며, 임상 광학단층영상 및 현미경 시장에 파급이 가능, 생물학 시료 검사 효율 향상 등 경제적 효율 향상 기대
- 산업 안전 분야 및 문화재 검사 분야 등에 확장 가능

- 사회적 기대효과
  - 병리학 의료 진단 분야 및 제약 분야 기술의 고도화로 삶의 질 향상 기대

## 7. 지원기간/예산/추진체계

- 연구개발기간 : 8년 이내
  - 정부지원연구개발비 : '25년 4.9억원 이내
    - 1~2단계까지 정부지원연구개발비 54.54억원 이내
    - 3단계까지 총 정부지원연구개발비 88.62억원 이내
- ※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  |     | 기간             | 개월수  | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월  | 490백만원    |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월  | 983백만원    |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월 | 1,327백만원  |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월 | 1,327백만원  |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월 | 1,327백만원  |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월 | 1,136백만원  |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월 | 1,136백만원  |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월 | 1,136백만원  |
| 합계  |     | -              | 87개월 | 8,862백만원  |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

- 주관기관 : 제한없음
    - 1단계부터 산업계 참여 권고, (2단계~) 산업계 참여 필수
- \* 2단계부터 산업계 참여가 필수이나 연구개발 수행 중에 포함하는 것을 허용, 다만 이 경우는 산업계 참여 계획을 반드시 포함하여 제시할 것(참여형태 : 주관/공동/위탁연구개발기관)

|               |  |          |                   |
|---------------|--|----------|-------------------|
| 연구유형          | 기초연구 (    ), 응용연구 ( ○ ), 개발연구 (    )   |          | TRL ( 3 )~( 5 )단계 |
| 과제특징          | 경쟁형(    ), 경쟁형(챌린지)(    ), SW자산뱅크등록(    ), 공개SW(    ), 기술료비징수(    ),<br>국제협력R&D(    ), 정책지정(    ), 혁신도약형(○), 표준화연계(    ), 사회문제해결형(    ),<br>일자리연계(    ), 소재부품장비(    ), 규제샌드박스(    ), 연구데이터공개(    ), 사업화연계(    ),<br>IP-R&D연계(    ) |          |                   |
| 구분            |  | 기술분야명/팀명 | 성명                |
| 책임PM(과제기획위원장) |  | 양자 PM    | 오윤제               |
| 담당 팀장         |  | 양자기술·산업팀 | 이민경               |

|  |   |  |         |
|--|---|--|---------|
| 관리번호   | 2025-양자센싱-9   |  | (지정공모형) |
| 기술분류   | 대분류(양자)-중분류(양자 센싱)-소분류(양자 광 센싱)-세분류(양자분광)           |  |         |
| 중점분야   | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( ) |  |         |
| 기획유형   | 파괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )      |  |         |
| 과제명  | 양자 유도결맞음 기반 중적외선 및 테라헤르츠 대역 저비용, 고효율 양자 분광 기술 개발    |  |         |
| 1. 개요  |   |  |         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (개념) 유도 방출 없는 유도결맞음(이하 양자 유도결맞음)은 1991년 Zou, Wang, Mandel에 의해 처음 실험적으로 확인된 양자광학 현상으로, 두 개의 비선형 결정에서 동일한 펌프광으로 광자쌍을 생성할 때, ‘아이들러’ 광자는 검출되지 않더라도 ‘시그널’ 광자 사이에서 간섭이 유도되는 현상임</li> <li>○ 결과적으로, 검출되지 않는 광자의 위상정보를 다른 광자의 측정으로 얻어낼 수 있으며, 이를 통해 검출기 및 광원 확보가 어려운 파장대역에서의 분광, 이미징, 센싱을 고효율의 기존 근적외선 검출기를 이용해 수행 할 수 있음</li> <li>○ 본 과제에서는 유도 방출 없는 유도결맞음(이하 양자 유도결맞음)을 기반으로 중적외선 분광 정보를 저비용, 고효율로 획득할 수 있는 양자 분광 기술 개발하는 것으로 함</li> <li>○ 중적외선(2 - 12 <math>\mu\text{m}</math> 대역)을 직접 검출하거나 고가의 중적외선 광원을 사용하지 않고도, 가시광선 또는 근적외선 영역에서 신호를 측정하여 대상 물질의 흡수, 위상, 분광 지문을 재구성하도록 구현하고, 테라헤르츠 대역의 분광 기술까지 병행 개발함</li> <li>○ 구현된 양자 분광 시스템으로 저비용 바이오 분자 분광을 검증함</li> </ul> |   |  |         |
| 2. 현황 및 필요성  |   |  |         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (기존 기술현황) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 중적외선 대역은 생체 파괴가 적은 분석이 가능하며 특히, 중적외선 대역 분광은 조직·세포 분석 등 바이오 지문 대역 분석에 활용됨</li> <li>- 기존 중적외선 파장 대역의 경우 광원 및 검출기는 고가이며, 냉각형 검출기의</li> </ul> </li> </ul>  |   |  |         |

필요 등 비용 및 복잡도, 그리고 고효율 측정에 어려움이 있음

- 양자 유도결맞음을 이용한 비검출 광자 측정 방식은 시료에 조사된 중적외선 광 신호를 저비용, 고효율 가시광 검출기로 신호를 읽어 고효율 분광 분석이 가능한 원리가 알려짐
- 현재까지 양자 유도결맞음을 이용하여 중적외선 대역에서의 분광학적 응용을 가시광선이나 근적외선 영역 광자의 측정으로 수행된 사례가 있으나, 국내에서는 개발된 사례가 없음 [Optica 11, 81 (2024), Nat. Photonics 10, 98 (2016)]

#### ○ (필요성)

- 바이오 시료(세포·조직·분자)의 분석을 위해서 고효율 분광 기술이 요구되며, 고효율, 저비용 분광 구현을 위해 양자 유도결맞음을 이용한 양자 분광 기술 개발이 필요함
- 양자 유도결맞음을 이용한 양자 분광 기술은 단일광자 간섭 기반 분광으로, 낮은 광자 플럭스 상황에서도 측정이 가능하며, 비파괴, 저조도 샘플에도 활용할 수 있음
- 또한, 넓은 파장 대역의 분석이 가능한 양자 분광의 적용을 위해서, 중적외선 대역의 양자 광원을 개발하고 양자 분광 시작품 개발 및 분자 검출 유효성 검증이 필요함

### 3. 수요분석

#### ○ (주요 수요처)

- 의료 및 바이오 진단: 라벨-프리 분광으로 조직/체액의 화학 지문 분석.
- 환경, 안전 모니터링: 공정 배출가스, 유해 화학물질 감지.
- 산업 공정 제어 및 품질 관리: 화학, 제약 공정에서의 실시간 분광 모니터링.
- (수요처 확장) 산업/문화재 정밀 분광, 무손상 분석

#### ○ (협력방안)

- 병원 및 바이오·제약: 조직, 세포, 분자 분광 FT-IR 등과 비교 분석

### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
- 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원

○ 최종목표(3단계) : 양자 유도결맞음을 이용한 중적외선 및 테라헤르츠 대역 양자 분광 시작품 개발 및 바이오 분자 분석 유효성 검증

- 가시광-중적외선 이중 파장간 (중적외선 파장, 2~12  $\mu\text{m}$ ) 얽힘 양자 광원 생성 기술 개발
- 양자 유도결맞음을 사용한 중적외선 분광 시작품 개발
- 측정하지 않는 광자의 모드 매칭 고도화 (타겟 샘플이 없는 상태에서 양자 간섭 Visibility 95% 이상)
- 테라헤르츠-가시광선 얽힘 생성 및 양자 분광 확장 기술 개발 (테라헤르츠 대역 파장 30  $\mu\text{m}$  이상)
- 양자 분광 바이오 시료 분광 유효성 검증 시연 4건 이상

※ 중적외선대와 테라헤르츠 대역 병행 개발

※ Visibility와 파장 목표를 동시에 달성할 필요 없음(예 : 3단계에 테라헤르츠 파장 따로 설정하고, Visibility는 중적외선에서 달성해도 됨)

○ 2단계 목표 : 가시광-중적외선 대역 이중 파장간 얽힘 양자 광원을 이용한 양자 분광 기술 개발 및 양자 분광 검증

- 가시광-중적외선 이중 파장간 (중적외선 파장 2~12  $\mu\text{m}$ ) 얽힘 양자 광원 생성 기술 개발
- 양자 유도결맞음을 사용한 중적외선 분광 모듈 개발
- 측정하지 않는 광자의 모드 매칭 고도화 (타겟 샘플이 없는 상태에서 양자 간섭 Visibility 90% 이상)
- 중적외선 대역 비검출 광자 센싱 기반 양자 분광 시작품 개발 2건 이상
- 양자 분광 유효성 검증 시연 2건 이상

○ 단계별 목표

| 구분             | 단계별 연구목표  |
|----------------|---|
| 1단계<br>(25~27) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 이중 파장간 얽힘 양자 얽힘 광원 및 양자 간섭 기반 검출 기술 개발</li> <li>- 가시광-중적외선 양자 광원 생성 기술</li> <li>- 양자 간섭 기반 비검출 광자 센싱 기술</li> </ul> |
| 2단계<br>(28~29) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 중적외선 대역 확장 양자 광원 기술</li> <li>- 중적외선 대역 양자 간섭 기반 양자 분광 시작품 개발</li> </ul>  |
| 3단계<br>(30~32) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 양자 분광 시작품 고도화 및 바이오 시료 분광 유효성 검증</li> <li>- 테라헤르츠 대역 양자 분광 기술 확장</li> </ul>  |

○ 정량적 연구개발목표

| 성능지표 |   | 단위 | 연구개발 목표치       |                |                | 연구개발 전<br>국내 수준 | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관)   |
|------|---|----|----------------|----------------|----------------|-----------------|---|
|      |   |    | 1단계<br>(25~27) | 2단계<br>(28~29) | 3단계<br>(30~32) |                 |   |
| 1    | 양자 광원 파장*                                   | μm | 2~5            | 6~12           | 30<br>이상       | -               | 4.7<br>(교토대, 일본)<br>6<br>(Friedrich Schiller<br>University Jena,<br>독일) |
| 2    | 양자 간섭 Visibility<br>(타겟 샘플 없는 상태에서<br>측정 시) | %  | 80             | 90             | 95             | -               | 79<br>(독일/MaxPlanck)**  |
| 3    | 중적외선 양자 분광 모듈<br>크기                         | =  | =              | 자율<br>제시       | 자율<br>제시       | =               | -   |
| 4    | 양자 분광 분자 검출 검증<br>(기존 분광 센서 대비 우수)          | -  | 1              | 2              | 4              | -               | -   |

\* 양자광 생성장비 시제품 구입 불가

\*\* Communications Physics 7, 217 (2024)

## 5. 연구내용

### o 전체(1~3단계) 연구내용

- ① 이중 파장간 양자 얽힘 광원 생성 및 모듈 개발
  - 가시광-중적외선 대역 (2~12 μm) 얽힘 양자 광원 생성 기술
  - 양자 광원 생성 테라헤르츠 대역 (30 μm 이상) 확장 기술
  - ※ 분광 필요 대역에 따른 양자 광원 파장 대역 정량적 제시
- ② 고효율 양자 분광 시스템 개발
  - 양자 유도 결맞음 양자 간섭계 고도화 기술 개발 (타겟 샘플 없는 상태에서 양자 간섭 Visibility 95% 이상)
  - 양자 분광 시작품 개발 및 양자 분자 우수성 검증 4건 이상
  - 기존 분광 센서와 특성 비교
  - ※ 분광 해상도 및 분광 파장 대역폭, 동시 검출 분자선 개수 등 분광 특성 정량적 제시 필수

### o 1~2단계까지 연구내용

- ① 이중 파장간 양자 얽힘 광원 생성 기술 개발
  - 가시광-중적외선 대역 (2~12 μm) 얽힘 양자 광원 생성 기술
  - ※ 분광 필요 대역에 따른 양자 광원 파장 대역 정량적 제시
- ② 비검출 광자 센싱 및 고효율 양자 분광 기술 개발
  - 유도 결맞음 양자 간섭계 기술 개발
  - 비검출 광자 검출 통한 고효율 중적외선 대역 측정 기술 개발
  - 양자 유도 결맞음 양자 간섭계 고도화 기술 개발 (타겟 샘플 없는 상태에서 양자

간섭 Visibility 90% 이상)

- 양자 분광 시작품 개발 및 양자 분자 우수성 검증 2건 이상 (기존 분광 센서와 특성 비교)
- ※ 분광 해상도 및 분광 파장 대역폭, 동시 검출 분자선 개수 등 분광 특성 정량적 제시 필수

## 6. 기대 효과

### ○ 과학기술적 파급효과

- 양자 광학 센서 기술의 국내 원천 기술 확보 및 양자 분광 시작품 국산화 개발 등 양자 기술의 국가적 독립성 확보
- 라벨-프리 정량 분광 분석으로 생물학, 병리 연구의 재현성 향상 기대

### ○ 경제적 파급효과

- 비냉각, 저가 중적외선 검출이 가능하여 중적외선 검출 활용 시장에 파급 가능

### ○ 사회적 기대효과

- 가스 검출, 분자 검출 등 산업 안전 분야에 활용 및 문화재 검사 분야 등에 활용

## 7. 지원기간/예산/추진체계

### ○ 연구개발기간 : 8년 이내

### ○ 정부지원연구개발비 : '25년 3.26억원 이내

- 1~2단계까지 정부지원연구개발비 36.36억원 이내
- 3단계까지 총 정부지원연구개발비 59.07억원 이내

※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음



| 구분  |     | 기간             | 개월수  | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월  | 326백만원    |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월  | 655백만원    |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월 | 885백만원    |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월 | 885백만원    |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월 | 885백만원    |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월 | 757백만원    |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월 | 757백만원    |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월 | 757백만원    |
| 합계  |     | -              | 87개월 | 5,907백만원  |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

○ 주관기관 : 제한없음

- 1~2단계 산업계 참여 권고, (3단계~) 산업계 참여 필수

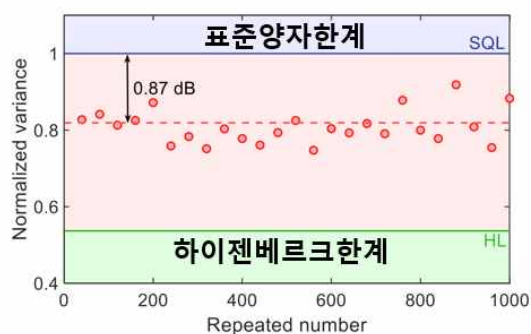
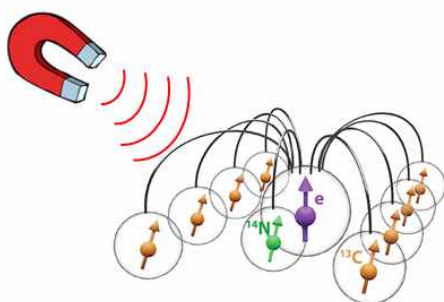
\* 3단계 산업계 참여 계획을 반드시 포함하여 제시할 것(참여형태 : 주관/공동/위탁연구개발기관)

|               |   |          |                   |
|---------------|---|----------|-------------------|
| 연구유형          | 기초연구 (    ), 응용연구 ( ○ ), 개발연구 (    )  |          | TRL ( 3 )~( 5 )단계 |
| 과제특징          | 경쟁형(    ), 경쟁형(챌린지)(    ), SW자산뱅크등록(    ), 공개SW(    ), 기술료비징수(    ), 국제협력R&D(    ), 정책지정(    ), 혁신도약형(○), 표준화연계(    ), 사회문제해결형(    ), 일자리연계(    ), 소재부품장비(    ), 규제샌드박스(    ), 연구데이터공개(    ), 사업화연계(    ), IP-R&D연계(    ) |          |                   |
| 구분            |   | 기술분야명/팀명 | 성명                |
| 책임PM(과제기획위원장) |   | 양자 PM    | 오윤제               |
| 담당 팀장         |   | 양자기술·산업팀 | 이민경               |

|      |   |         |
|------|---|---------|
| 관리번호 | 2025-양자센싱-10  | (지정공모형) |
| 기술분류 | 대분류(양자)-중분류(양자센싱)-소분류(양자전·자기장센싱)-세분류(양자자기장센싱)       |         |
| 중점분야 | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( ) |         |
| 기획유형 | 파괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )      |         |
| 과제명  | 고체 점결합 양자얽힘 큐비트쌍 기반 고전 한계 극복 양자센싱 핵심기술 개발           |         |

## 1. 개요

- 고전센서로는 불가능한 초고감도를 달성하기 위해서는 기존의 단일 큐비트나 앙상블 큐비트에서 벗어나 양자얽힘, 압축 기반의 양자센싱 기술 개발이 필요함
- 고체 점결합의 경우 다중 큐비트 양자얽힘을 활용한 민감도 고도화 초기 연구가 진행중이며, 이를 활용하여 표준양자한계를 뛰어넘는 민감도 달성에 필요한 핵심 원천기술의 개발이 필요함
- 고체 점결합 다중 큐비트 양자얽힘을 이용하여 다양한 양자센싱 프로토콜을 개발하고, 이를 활용하여 표준양자한계를 넘어서 하이젠베르크 한계에 도전하는 민감도를 구현하는 것을 목표로 함



### <과제 개념 소개>

## 2. 현황 및 필요성

- (기존 기술현황) 현재 고체 점결합 (예: 다이아몬드 NV 센터 등) 기반의 단일 큐비트 및 앙상블 큐비트를 이용한 양자센싱 기술은 자기장, 전기장, 온도 측정 등 다양한 분야에서 기초연구 및 응용 연구로 활용되고 있으며, 상업적 양자센서 제품 개발도 활발히 진행되고 있음

- 하지만, 이러한 기술들은 궁극적으로 표준 양자한계의 물리적 제약으로 인해 감도 향상에 근본적인 한계가 존재함
- 기존의 민감도 한계를 넘어 양자이득을 달성하고, 궁극적으로 하이젠베르크 한계에 도달하기 위해서는 큐비트 간의 얽힘 상태를 정밀하게 구현하고 이를 유지한 상태에서 외부 물리량을 계측할 수 있는 고도화된 양자센싱 프로토콜 개발이 필수적임[1]
- 하지만, 현재 고체 점결합 기반 얽힘 큐비트 쌍의 정밀 제어 및 감도 향상을 위한 양자센싱 프로토콜 연구는 초기 단계에 머물러 있어 본격적인 기술 개발이 요구됨

[1] T. Xie et al., Beating the standard quantum limit under ambient conditions with solid-state spins, Science Advances, 7, eabg9204 (2021).

- **(필요성)** 고체 점결합 기반 양자센싱 민감도를 고도화하여 고전적 센싱 기술로는 도달할 수 없는 민감도 수준을 구현하기 위해서는, 단일 큐비트 및 앙상블 큐비트 수준에서 벗어나 다중 큐비트 얽힘 기반 양자센싱 기술 개발이 필수적임[2]
- 얽힘 기반 양자센싱 기술은 향후 자기장·전기장·온도 등 정밀 측정 분야의 패러다임을 바꿀 수 있는 핵심 원천기술로, 양자센서 응용 및 산업화로의 확장이 가능함
- 따라서, 본 과제를 통해 고체 점결합 기반 얽힘 큐비트 양자센싱 기술을 체계적으로 개발하고, 향후 관련 산업으로의 확산을 위한 기술 기반을 마련할 필요성이 큼

[2] V. Vorobyov et al., Quantum Fourier transform for nanoscale quantum sensing, npj Quantum Information, 7, 124 (2021).

### 3. 수요분석

#### ○ (주요 수요처)

- 고체 점결합 기반 양자센싱 연구기관 및 학계 연구자들과 초정밀 계측이 필요한 연구기관 및 고감도 양자센서 개발을 추진하는 양자센서 관련 산업계가 주요 수요처로 예상

#### ○ (협력방안)

- 양자플래그십 내 ‘다이아몬드 NV 센터 기반 고감도 고분해능 양자 MRI, 심자도 기술 개발’ 과제와의 기술 연계 및 협력 연구를 통하여, 얽힘 기반 양자센싱 기술이 바이오·의료 분야 응용에 접목될 수 있도록 협력 방안 모색이 필요함 (2단계 후반 및 3단계). 양자플래그십 과제 간 상호 기술 워크숍 및 공동 개발 프로그램 운영을 통한 연구 시너지 창출을 꾀할 수 있음
- 본 과제는 원천기술 개발 성격이 크기 때문에 초기 기업 참여는 필수적이지 않으나, 과제 후반부에서는 양자센서 연구기관 및 관련 기업들과의 기술이전, 상용화협력 방안 등을 모색이 필요함

#### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
- 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원

#### ○ 최종목표(3단계) : 얽힘 큐비트쌍 기반 하이젠베르크 한계 도전 양자센싱 기술 개발

- 다중 큐비트 레지스터 구현: 5-10개 이상의 큐비트로 이루어진 레지스터 구성함 (예: 다이아몬드 NV-NV 쌍, NV-헥스핀쌍 등)
- 민감도 : 양자얽힘 센싱 프로토콜 전후의 민감도를 비교하여 (예: 자기장, 온도 등 물리량에 제한은 없음) 하이젠베르크 한계에 근접하는 민감도(또는 Fisher information)를 보임
  - \* 연구자가 하이젠베르크 한계를 계산적으로 제시하고, 이 한계에 어느정도 근접하하는 민감도를 달성할지 목표 제시 필요 (예: 하이젠베르크 한계 3dB 이내 민감도 구현 등)
- 근거리 : 본 과제는 양자얽힘 기반의 양자센싱 핵심기술 개발이기 때문에, 타겟 샘플로부터 근거리에서 관련 기술을 확보하는 것이 중요. 따라서, 5 nm 이하의 근거리의 큐비트를 활용해야 함
  - \* 마이크로미터 이상 깊이의 고체 점결함 큐비트 얽힘을 이용한 양자컴퓨팅, 양자네트워크 연구와 구별 필요
- 얽힘 기반 프로토콜 통한 양자센싱 성능 데모 : 다중 큐비트 기반의 양자센싱 프로토콜을 사용하여 물리량 (예: 자기장) 정밀 센싱 데모

#### ○ 2단계 목표 : 얽힘 큐비트쌍 기반 고전 한계 극복 양자센싱 기술 개발

- 다중 큐비트 레지스터 구현: 3-5개 이상의 큐비트로 이루어진 레지스터 구성함
- 민감도 : 양자얽힘 센싱 프로토콜 전후의 민감도를 비교하여 표준양자한계를 극복하는 민감도(또는 Fisher information)을 보임.
  - \* 연구자가 표준양자한계를 계산적으로 제시하고, 이 한계를 어느정도 넘어서는 민감도를 달성할지 목표 제시 필요 (예: 표준양자한계 3dB 이하의 민감도 구현 등)
- 근거리 : 10-30 nm 이하의 근거리의 큐비트를 활용하여 목표 달성
  - \* 1단계에서 마이크로미터 깊이의 큐비트 얽힘을 활용하여 테스트 실험을 진행해도 무방하나, 2 단계 이전에 근거리 큐비트 레지스터를 사용해야 함
- 얽힘 기반 양자센싱 프로토콜 개발: 다중 큐비트 기반의 양자센싱 프로토콜 개발 (예: quantum memory, quantum Fourier transform, GHZ-entangled sensing, quantum correlation measurement 등)

## ○ 단계별 목표

| 구분               | 단계별 연구목표  |
|------------------|---|
| 1단계<br>(‘25~’27) | 다중 큐비트 레지스터 구현 및 얽힘 기반 양자센싱 프로토콜 개발<br>- 큐비트 수: 2개 이상<br>- 근거리: 마이크로미터 깊이의 큐비트 활용한 얽힘 센싱 테스트 가능<br>- 얽힘 기반 양자센싱 프로토콜 개발   |
| 2단계<br>(‘28~’29) | 얽힘 큐비트 활용한 표준양자한계를 극복하는 민감도 달성<br>- 큐비트 수: 3-5개 이상<br>- 근거리: 10-30 nm 이하의 근거리 큐비트 레지스터 활용<br>- 제시된 표준양자한계이하의 민감도 목표치 달성<br>- 얽힘 기반 양자센싱 프로토콜 고도화 및 물리량 센싱 테스트 진행                  |
| 3단계<br>(‘30~’32) | 다중 큐비트 레지스터, 양자센싱 프로토콜 고도화 및 하이젠베르크 한계에 도달하는 기술 개발<br>- 큐비트 수: 5-10개 이상<br>- 근거리: 5 nm 이하의 근거리 큐비트 레지스터 활용<br>- 제시된 하이젠베르크한계에 근접하는 민감도 목표치 달성<br>- 얽힘 기반 프로토콜을 활용한 물리량 양자센싱 성능 데모 |

## ○ 정량적 연구개발목표

| 성능지표  | 단위 | 연구개발 목표치                                |                   |                                 | 연구개발 전<br>국내 수준                       | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관)                                      |
|---|----|---|-------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--|
|   |    | 1단계<br>(25~27)                          | 2단계<br>(28~29)    | 3단계<br>(30~32)                  |                                       |  |
| 1 큐비트 레지스터 수  |    | 2                                       | 3-5               | 5~10                            | 2~3                                   | 7 (네덜란드/Delft) <sup>3</sup>                                |
| 2 민감도<br>*물리량 (예: 자기장)과<br>민감도 목표치(예: 3dB)<br>는 연구자가 제시 |    | 단일 큐비트 보 다 높은 민감도                       | 표준 양자 한 계에 극복 여 부 | 하 이 젠 베 르 크 한 계 에 근 접 하 는 발전 정도 | 단일 큐비트 기반 10-100 nT/Hz <sup>0.5</sup> | 표준양자한계 0.87dB 이하의 민감도 구현 (중국/USTC, 독일/함부르크) <sup>1,2</sup> |
| 3 큐비트 깊이  |    | μm 깊이의 큐비트 를 이 용 한 표 준 양 자 한 계 극 복 도 허용 | 10-30 nm          | 5 nm                            | 5 nm ~ 수 μm                           | 깊이만의 성능지표는 큰 의미없고 이 깊이에서 다중 큐비트를 활용한 민감도 향상을 달성하는 것이 중요함   |
| 4 (정성) 다중 큐비트<br>기반 양자센싱 프로토콜<br>개발                     | 정성 | -                                       | 프로토콜 개발           | 프로토콜 활용 물리량 센싱 성능 데모            |                                       |  |

[3] C. E. Bradley et al., A Ten-Qubit Solid-State Spin Register with Quantum Memory up to One Minute, Physical Review X, 9, 031045 (2019).

## 5. 연구내용

### o 전체(1~3단계) 연구내용

#### ① 다중 큐비트 레지스터 구현

- 5-10개 이상 고체 점결합 다중 큐비트 레지스터 구현 (예: 다이아몬드 NV-NV 쌍, NV-핵스핀 쌍 등)
- Multi-qubits 얽힘 fidelity 향상

#### ② 하이젠베르크 한계 도전 기술 개발

- 다중 큐비트 얽힘 기반 민감도 고도화 및 하이젠베르크 한계 도전 (정량적 목표치는 연구자가 제시)
- 5 nm 이하 근거리 큐비트 레지스터에서 데모

#### ③ 얽힘 기반 프로토콜을 활용한 양자센싱 데모 및 성능 평가

- 다중 큐비트 얽힘 기반 양자센싱 프로토콜을 활용하여 실제 물리량 측정에 활용하고 성능을 데모하고 평가함
- 큐비트 initialization, gate operation, readout 등의 fidelity를 고도화
- 고해상도 양자이미징과 접목 가능한 기술 개발 (예: 다이아몬드, 광구조체 제작)

### o 1~2단계까지 연구내용

#### ① 다중 큐비트 레지스터 구현

- 3-5개 이상 고체 점결합 다중 큐비트 레지스터 구현
- 다중 큐비트간 양자얽힘 구현, two-qubits/multi-qubits 얽힘 fidelity 향상

#### ② 표준양자한계 극복 기술 개발

- 다중 큐비트 얽힘 기반 민감도 고도화 및 표준양자한계 극복 구현 (정량적 목표치는 연구자가 제시)
- 10-30 nm 이하 근거리 큐비트 레지스터에서 데모

#### ③ 얽힘 기반 양자센싱 프로토콜 개발

- 다중 큐비트 얽힘 기반 양자센싱 프로토콜 개발 (예: quantum memory, quantum Fourier transform, GHZ-entangled sensing, quantum correlation measurement 등)
- 다중 큐비트 얽힘에 필요한 초기화 등 다양한 성능 향상 및 결맞음 시간 향상 기술 개발
- 나노필라, 광구조체 등 공정 및 측정 효율 향상 기술 개발 포함 가능
- 점결합 밀도, 위치 제어 및 생성 기술 포함 가능

## 6. 기대 효과

### ○ 과학기술적 파급효과

- 고체 점결합 큐비트 간 양자얽힘을 구현하고, 이를 이용한 양자센싱 프로토콜을 개발하여 기존 고전적 센싱 기술이 도달할 수 없는 민감도 한계를 실증함으로써 차세대 양자센싱 기술의 원천기술을 확보함
- 기존 단일 큐비트 기반 센서 대비 감도 및 공간 해상도에서 획기적인 성능 향상을 입증할 수 있으며, 고전계측 기술 대비 기술적 차별성을 확고히 할 수 있음
- 개발된 얽힘 큐비트 제어 및 측정 기술, 양자 상태 제어 프로토콜 등은 향후 양자 컴퓨팅, 통신, 센싱 등 다양한 양자 기술 분야로의 응용 확장이 가능하고 양자 정보과학 전반의 시너지 효과를 창출할 수 있음

### ○ 경제적 파급효과

- 현재 글로벌 양자센서 산업은 초기 성장 단계로, 고체 점결합 기반 얽힘 양자센싱 기술을 선제적으로 확보할 경우, 국내 산업계는 고감도·고해상도 정밀 계측 시장에서 기술적 우위를 선점할 수 있음
- 본 과제를 통해 확보된 원천기술은 의료, 바이오, 반도체, 정밀 계측 등 다양한 응용 분야에 파급 적용이 가능하며, 향후 양자센서 상용화 및 산업화 초기 시장에서 기술 주도권 및 선점 효과를 기대할 수 있음

## 7. 지원기간/예산/추진체계

### ○ 연구개발기간 : 8년 이내

### ○ 정부지원연구개발비 : '25년 9.07억원 이내

- 1~2단계까지 정부지원연구개발비 75.27억원 이내
- 3단계까지 총 정부지원연구개발비 117.87억원 이내

※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  |     | 기간             | 개월수  | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월  | 907백만원    |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월  | 1,862백만원  |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월 | 1,586백만원  |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월 | 1,586백만원  |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월 | 1,586백만원  |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월 | 1,420백만원  |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월 | 1,420백만원  |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월 | 1,420백만원  |
| 합계  |     | -              | 87개월 | 11,787백만원 |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

○ 주관기관 : 제한없음

※ 산업계 참여 권고

|               |   |          |                   |
|---------------|---|----------|-------------------|
| 연구유형          | 기초연구 ( ○ ), 응용연구 (    ), 개발연구 (    )  |          | TRL ( 2 )~( 3 )단계 |
| 과제특징          | 경쟁형(    ), 경쟁형(챌린지)(    ), SW자산뱅크등록(    ), 공개SW(    ), 기술료비징수(    ), 국제협력R&D(    ), 정책지정(    ), 혁신도약형(○), 표준화연계(    ), 사회문제해결형(    ), 일자리연계(    ), 소재부품장비(    ), 규제샌드박스(    ), 연구데이터공개(    ), 사업화연계(    ), IP-R&D연계(    ) |          |                   |
| 구분            |   | 기술분야명/팀명 | 성명                |
| 책임PM(과제기획위원장) |   | 양자 PM    | 오윤제               |
| 담당 팀장         |   | 양자기술·산업팀 | 이민경               |



|  |   |         |
|--|---|---------|
| 관리번호   | 2025-양자센싱-11  | (지정공모형) |
| 기술분류   | 대분류(양자)-중분류(양자센싱)-소분류(양자계측)-세분류(양자압착기반센싱)           |         |
| 중점분야   | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( ) |         |
| 기획유형   | 파괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )      |         |
| 과제명  | 원자 기반 양자센싱 핵심원천기술 개발                                |         |
| <div>1. 개요</div> <p>○ 원자의 고유한 특성을 활용한 원자 스핀 상태의 압착 및 원자-광자의 상호작용을 통한 고효율 양자얽힘 생성을 통해 원자 매질을 이용한 고품질 양자 상태 생성/제어/측정 플랫폼을 구축하고, 이를 바탕으로 다중 원자 얽힘 및 스핀 압착 상태를 생성하여 고감도 전기장·자기장 양자센싱 기술을 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 원자 앙상블 기반 압착 광원 및 얽힘 광원 기술: 원자 앙상블을 활용하여 고품위 압착광 및 양자 얽힘 상태를 생성하고 이를 원자 기반 양자센싱의 감도를 높이는데 활용하는 제어 및 측정 기술 개발</li> <li>- 원자 스핀 상태 압착을 활용한 양자 센싱 응용 기술: 원자 앙상블의 스핀 상태 압착 기술을 이용하여 표준양자한계를 뛰어넘는 고감도 양자 센싱 응용 기술 개발</li> <li>- 고감도 전기장·자기장 센싱 원천 기술: 원자 앙상블 기반으로 기존 양자 센서의 성능을 뛰어넘는 고감도 전기장·자기장 센싱 원천 기술 개발</li> <li>- 원자-스핀 상태 생성 및 양자 센서 응용 기술: 원자 앙상블을 이용한 원자-스핀 상태 생성 및 스핀 압착 핵심 기술을 개발하고, 이를 다양한 양자 센서 응용 분야에 적용하는 기술, 원자 앙상블을 활용하여 광자와 상호작용을 통해서 양자 센싱의 효율성과 성능을 극대화하는 기술 개발</li> </ul> |   |         |
| <div>2. 현황 및 필요성</div> <p>○ 현재 원자 앙상블 기반 양자 센서는 정밀도와 정확도 향상을 통한 양자 이득 달성이 매우 중요함. 이를 위해서는 얽힘, 압착 등 양자 자원을 활용하여 표준 양자 한계를 극복하는 기술에 대한 연구가 필요함</p> <p>○ 국내에서는 원자 매질에서 고품질 양자 얽힘 광원 생성에 대한 독자적인 기술 개발을 통해 국제적인 수준의 연구 성과를 발표하고 있음. 하지만 국제 경쟁력을 갖추기 위해서는 원자 기반 양자 자원의 성능 고도화 및 소형화를 위한 후속 연구가 지속적으로 이루어질 필요가 있음</p>  |   |         |

- 해외 연구 동향을 살펴보면, 원자 기반 양자 자기 센서 분야에 압착된 광원을 활용하여 표준양자한계를 극복하는 연구가 활발히 진행 중. 특히 원자 앙상블에서 생성된 압착광은 원자 기반 양자 센서에 활용성이 높고 장치 복잡도가 상대적으로 낮아 실용적인 응용 가능성이 매우 높게 평가됨
- 원자 기반 양자 전기장 센서 분야에서는 리드버그 원자 매질을 냉각 원자 및 원자 증기 셀에서 구현하고 고감도 전기장 양자 센서 구현 및 감도 개선을 위한 다양한 연구 방법들이 활발하게 발표되고 있음. 이는 고감도 THz 이미징, 차세대 THz 통신, 생체 전기장 측정 기술 등 다양한 응용 분야로의 확장 기대
- 국내 대학 및 출연(연)에서는 원자 증기 셀 기반 원자 자기장 센싱, 원자 자이로, 리드버그 원자를 이용한 전기장 센서에 대한 기초 연구가 수행되고 있으나, 압착 또는 얽힘 광원을 활용하여 표준양자한계를 돌파하는 도전적인 연구는 아직 달성된 바 없음. 따라서 국내 양자 센서 기술의 경쟁력 확보를 위해서는 이러한 핵심 기술에 대한 집중적인 투자가 필요함

### 3. 수요분석

- (주요 수요처)
  - 국방 및 안보 분야: 스텔스 탐지, 잠수함 탐지, 자기 지뢰 탐지, 비접촉식 폭발물 탐지, 정밀항법 시스템, 차세대 통신 등 각 군에 응용 가능
  - 경찰청, 소방청 등: 테러 방지, 위험 물질 탐지, 지진 예측 등 재난 안전 분야
  - 국내외 의료기관, 의료장비 업체, 센서 기업 등 소형 고성능 양자 자기장 센서 활용 및 제작 관련 기관들과 기업들
  - 산업 및 계측 분야: 반도체 제조 기업, 정밀 계측 장비 기업이 수요처. 반도체 공정에서의 미세 자기장 및 전기장 측정, 초고감도 센서를 활용한 불량 검사
  - 지질학 및 자원 탐사 기업: 지구 자기장 변화 측정, 지하 자원 탐사
  - 의료 및 바이오 분야: 대학병원, 연구소, 의료기기 제조 기업이 주요 수요처. 비침습적 진단, 생체 자기장 측정, 약물 반응 모니터링, 세포 활성도 분석 등
- (협력방안) 원자 기반 양자 센싱 핵심원천기술의 성공적인 실증 및 사업화를 위해서는 주요 수요처와의 긴밀한 연계 및 다각적인 협력이 필수적
  - 국방 및 안보 분야: 국내 군사 연구기관 및 각 군과의 협력을 통해 실제 작전 환경에 필요한 초고감도 비접촉식 탐지 센서 (예: 잠수함 탐지, 자기 지뢰 탐지)
  - 의료 및 바이오 분야: 대학병원 및 의료기기 제조 기업과의 협력을 통해 고해상도 비침습 뇌/심장 진단 장치 개발을 목표로 임상 환경에서의 유효성 및 안전성 검증

#### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름

#### ○ 최종목표(3단계) : 얽힘 및 압착 등의 양자자원을 활용한 표준양자한계 극복 원자 기반 양자 센서 핵심 원천기술 개발

- 원자양상불 기반 양자광원을 활용하여 원자기반 양자 센서의 표준양자한계 극복 핵심 원천기술 개발
- 양자자원을 활용한 원자기반 양자 센싱의 양자 이득 응용 기술 확보 및 개발된 양자 이득 기술을 양자 센서 응용 기술 연계하여 주요 수요처에서 활용할 수 있도록 유도

#### ○ 2단계 목표 : 원자 양상불 기반 고효율 양자얽힘 및 압착 광원을 활용한 원자 기반 양자 센서의 양자 이득 핵심 원천기술 개발

- 양자 센서의 양자 이득을 위한 양자 광원 확보 : 원자와 상호작용이 효과적인 원자 양상불 기반 양자 얽힘 (fidelity 95% 이상) 또는 양자 압착 (산탄잡음한계 대비 노이즈 감소 10 dB 이상) 광원 개발
- 양자 센서 민감도: 원자와 상호작용하는 광자의 산탄잡음 한계를 극복한 원자기반 양자센서 구현 (자기장)  $\text{sub-fT/Hz}^{0.5}$  또는 (전기장)  $20 \text{ nV/cm}^{0.5}$  이하

#### ○ 단계별 목표

| 구분  | 단계별 연구목표  |
|-----|---|
| 1단계 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 원자 양상불 기반 고품위 압착광 및 양자 얽힘 광원 생성 기술 개발</li> <li>- 원자-광자 상호작용 기반 양자상태 제어/측정 플랫폼 구축</li> </ul>  |
| 2단계 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 원자양상불 기반 양자 광원과 원자 스핀 압착 또는 다중 전이 원자계를 활용한 표준양자한계 극복 핵심 원천기술 개발</li> <li>- 전기장 또는 자기장 고감도 측정을 위한 원자 양상불 기반 양자센싱 핵심 기술 고도화</li> </ul> |
| 3단계 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 양자 이득 기술 바탕의 양자센서 응용 연계 기술 확보 및 성능 최적화</li> <li>- 주요 수요처 협력을 통한 양자센서 기술 현장 적용 가능성 검증</li> </ul>                                      |

#### ○ 정량적 연구개발목표

| 성능지표 |                     |                      | 단위                   | 연구개발 목표치       |                |                | 연구개발 전<br>국내 수준 | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관) |
|------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------------|
|      |                     |                      |                      | 1단계<br>(25~27) | 2단계<br>(28~29) | 3단계<br>(30~32) |                 |                       |
| 1    | 원자양상불 기반<br>양자압착 광원 |                      | dB                   | 8              | 10             | 10             | 5               | 10<br>(미국/NIST)       |
| 2    | 전기장                 | 양자 센서<br>민감도         | nV/cm <sup>0.5</sup> | 100            | 20             | 10             | 500             | 55<br>(중국/Shanxi대)    |
| 3    |                     | 양자 센서<br>응용 기술<br>연계 | nV/cm <sup>0.5</sup> | -              | -              | 10             | 최초 시도           | 최초 시도                 |
| 4    | 자기장                 | 양자 센서<br>민감도         | fT/Hz <sup>0.5</sup> | 20             | 1              | <0.5           | 100             | 18<br>(중국/상하이교통대)     |
| 5    |                     | 양자 센서<br>응용 기술<br>연계 | fT/Hz <sup>0.5</sup> | -              | -              | <0.5           | 최초 시도           | 최초 시도                 |

※ 연구자는 전기장·자기장 양자센싱 개발 제안시, 두 가지 중 하나를 선택하고 위 정량적 연구개발목표치를 기반으로 단계별 달성 수치를 제시하고, 필요에 따라 연구자는 추가 지표 활용 가능

## 5. 연구내용

### o 전체(1~3단계) 연구내용

- ① 양자 센서의 양자 이득 실현을 위한 양자 광원 확보
  - 다광자 전이를 통해 원자를 이용한 고효율 양자 얽힘 광원 생성 또는 원자의 비선형 현상을 이용한 양자 압착 상태 생성 원천 연구
  - 원자와 상호작용이 효과적인 원자양상불 기반 양자 얽힘 (fidelity 95% 이상) 또는 양자 압착 (산탄잡음한계 대비 노이즈 감소 10 dB 이상) 광원 연구
- ② 고효율 양자얽힘 및 압착 등의 양자자원을 이용한 원자양상불 기반 양자 센서의 양자 이득 구현
  - 원자양상불 기반 고품위 양자 얽힘/압착 광원을 이용하여 원자기반 양자센서의 표준양자한계 극복 기술 연구
  - 양자 센서 민감도: 원자와 상호작용하는 광자의 산탄잡음 한계를 극복한 원자기반 양자센서 구현 (자기장) <0.5 fT/Hz<sup>0.5</sup> 또는 (전기장) 10 nV/cm<sup>0.5</sup> 이하
- ③ 원자양상불을 이용한 양자 얽힘 생성/스핀 압착 생성기술을 기반으로 한 표준 양자한계 극복 양자 센싱 응용 기술 확보 및 유효성 검증
  - 3단계 개발된 양자 이득 기술을 양자 센서 응용 기술 연계하여 주요 수요처에서 활용할 수 있도록 유도

## o 1~2단계까지 연구내용

### ① 양자 센서의 양자 이득 실현을 위한 양자 광원 확보

- 다광자 전이를 통해 원자를 이용한 고효율 양자 얽힘 광원 생성 또는 원자의 비선형 현상을 이용한 양자 압착 상태 생성 원천 연구
- 원자와 상호작용이 효과적인 원자앙상블 기반 양자 얽힘 (fidelity 95% 이상) 또는 양자 압착 (산탄잡음한계 대비 노이즈 감소 10 dB 이상) 광원 연구

### ② 고효율 양자얽힘 및 압착 등의 양자자원을 이용한 원자앙상블 기반 양자 센서의 양자 이득 구현

- 원자앙상블 기반 고품위 양자 얽힘/압착 광원을 이용하여 원자기반 양자센서의 표준양자한계 극복 기술 연구
- 양자 센서 민감도: 원자와 상호작용하는 광자의 산탄잡음 한계를 극복한 원자기반 양자센서 구현 (자기장)  $\text{sub-fT/Hz}^{0.5}$  또는 (전기장)  $20 \text{ nV/cm}^{0.5}$  이하

## 6. 기대 효과

- o 원자기반 양자광원과 전기장/자기장 측정을 위한 원자 양자상태 변화의 정밀 측정 분광학 기술을 확보하여, 차세대 고감도 계측 및 센싱 분야의 핵심 경쟁력을 강화
- o 원자 앙상블을 이용한 고품질 양자얽힘 상태 생성 및 양자센서 적용을 통해 높은 정확도 달성과 기존 측정 기술의 한계를 극복하는 양자 계측 기술 개발을 확보. 기존 고전 계측 기술에 일부 양자 개념을 도입하는 방식으로 구현하여 산업 적용 가능성을 높임
- o 연구를 통해 확보된 양자 제어 및 측정 기술은 실용화가 가능한 양자 센싱 소자 개발로 이어질 것으로 기대되며, 양자 핵심 하드웨어의 국산화를 통해 양자기술의 국가적 독립성을 보장

## 7. 지원기간/예산/추진체계

### o 연구개발기간 : 8년 이내

### o 정부지원연구개발비 : '25년 9.07억원 이내

- 1~2단계까지 정부지원연구개발비 75.27억원 이내
- 3단계까지 총 정부지원연구개발비 117.87억원 이내

※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이

통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  | 기간  | 개월수            | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월       |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월       |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월      |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월      |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월      |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월      |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월      |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월      |
| 합계  | -   | 87개월           | 11,787백만원 |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

○ 주관기관 : 제한없음

※ 산업계 참여 권고

|               |  |                   |
|---------------|--|-------------------|
| 연구유형          | 기초연구 ( ○ ), 응용연구 (   ), 개발연구 (   )   | TRL ( 2 )~( 3 )단계 |
| 과제특징          | 경쟁형(   ), 경쟁형(챌린지)(   ), SW자산뱅크등록(   ), 공개SW(   ), 기술료비징수(   ), 국제협력R&D(   ), 정책지정(   ), 혁신도약형(○), 표준화연계(   ), 사회문제해결형(   ), 일자리연계(   ), 소재부품장비(   ), 규제샌드박스(   ), 연구데이터공개(   ), 사업화연계(   ), IP-R&D연계(   ) |                   |
| 구분            |  | 기술분야명/팀명          |
| 책임PM(과제기획위원장) |  | 양자 PM             |
| 담당 팀장         |  | 양자기술·산업팀          |
|               |  | 성명                |
|               |  | 오윤제               |
|               |  | 이민경               |

|   |   |         |
|---|---|---------|
| 관리번호  | 2025-양자센싱-12  | (지정공모형) |
| 기술분류  | 대분류(양자)-중분류(양자 센싱)-소분류(양자 광 센싱)-세분류(양자현미경)          |         |
| 중점분야  | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( ) |         |
| 기획유형  | 파괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )      |         |
| 과제명   | 고순도, 고동일성 단광자 고도화 모듈 개발 및 이를 활용한 다중 광자 얽힘 기술 개발     |         |
| <div>1. 개요</div> <p>○ (개념) 단일광자 광원은 양자정보 처리 및 양자계측의 핵심 자원으로, 다중 광자 얽힘 상태 생성의 기반이 됨. 이를 위해 단일광자 광원은 고순도 (<math>g(2)(0) \ll 1</math>)와 광자 간 높은 동일성(HOM visibility &gt; 0.98)이 요구되며, 이를 충족하는 고도화된 모듈 개발이 필요함</p> <p>○ 이를 위해 고순도, 고동일성 단일광자 광원을 개발하고, 해당 광원을 활용하여 다중광자 얽힘 상태를 생성 및 확장함으로써, 실제 양자 계측에 적용 가능한 고신뢰성, 고성능 광자 기반 플랫폼을 개발하는 것을 목표로 함</p> <p>○ 광기반 양자 센싱의 이점과 동시에 효율 확보를 위한 고순도, 고동일성 양자 광원 소자 개발 및 고도화, 대규모 양자 얽힘 광원을 이용한 양자 센싱 및 이미징 구현 검증</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고순도, 고동일성 단광자 실용화 소자 개발</li> <li>- 단광자 다수 동시 생성 확장 및 고효율 다광자 상태 생성 기술 개발</li> <li>- 대규모 양자 얽힘 광원 기반 양자 센싱 구현 검증</li> </ul> |   |         |
| <div>2. 현황 및 필요성</div> <p>○ (기존 기술현황)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 양자 광학 실험에 손쉽게 활용될 수 있는 고성능 단광자 등 양자 광원 소자가 개발되고 있으며, 최근 관련 원천 기술 보유 그룹을 중심으로 신생 기업들이 생겨나고 있음.</li> <li>- 양자점 기반 단일광자는 높은 순도 (2차 상관 계수 <math>g(2)(0) &lt; 0.01</math>)와 높은 동일성 (HOM visibility &gt; 0.93) [Nat. Nanotechnol. 17, 829 (2022)]을 보임.</li> <li>- 비선형 크리스탈을 통해 생성된 heralded 단일광자는 높은 순도 (2차 상관 계수 <math>g^{(2)}(0) &lt; 0.01</math>)와 높은 동일성 (HOM visibility &gt; 0.96)을 보인바 있으며, 생성된 광자를 활용하여 12-광자 GHZ 얽힘 상태를 생성한 사례 있음 [Phys. Rev. Lett.</li> </ul>   |   |         |

121, 250505 (2018)]

○ (필요성)

- 양자 계측은 고전적 한계를 뛰어넘는 정밀도(Heisenberg limit)를 제공하며, 다중 광자 얽힘을 이용한 실험은 실제 parameter estimation에서 우위를 보이고 있어 국내에서도 활발한 연구가 필요함
- 또한, 국내에서는 아직 광자수 4 이상의 다중광자 얽힘 상태를 구현한 사례가 많지 않음
- 이를 위해 고순도, 고동일성 단일광자 광원 개발이 필요하며, 실제 활용 가능성이 있는 다중 광자 GHZ 상태, W 상태, Cluster 상태들을 구현할 수 있는 기술 개발이 필요함

### 3. 수요분석

○ (주요 수요처)

- 양자 광학을 기반으로 연구 중인 연구 기관 및 양자 광원 활용이 필요한 기업
- 고정밀 간섭계 기반 센싱이 필요한 양자 광학 기반 센싱 활용 수요처 (바이오 및 의료, 산업 안전 분야)

○ (협력방안)

- 양자 광학 기초 연구 기관, 대학 및 양자 광원 활용 기관 협력 통한 특성 검증

### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
- 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원

○ **최종목표(3단계) : 고순도, 고동일성 단광자 고도화 모듈 개발 및 이를 활용한 다중 광자 얽힘 기술 개발**

- 고순도 ( $g^{(2)}(0) \leq 0.01$ ), 고동일성 (HOM visibility > 98%) 단광자 생성 소자 개발
- 동시 생성 단광자 확장, 다수 광자 동시 생성 기술 개발 (광자수 24 이상)
- 다중 광자 얽힘 상태 생성 (광자수 16 이상)
- 다중 광자 얽힘 기반 양자 광학 센싱 구현 기술 개발



- 다중 광자 얽힘 기반 양자 센싱 검증 3건 이상

※ 개발 플랫폼은 양자점, 비선형 크리스탈, 원자 등 한 가지를 선택하여 자유 제안

※ 다중 광자 얽힘 상태는 GHZ 상태, W 상태, Cluster 상태 등 자유 제안

○ 2단계 목표 : 고순도, 고동일성 특성을 갖는 단광자 소자 및 다광자 확장 기술 확보, 다수 얽힘광원을 활용한 양자 광학 센싱 기술 개발

- 고순도 ( $g^{(2)}(0) \leq 0.03$ ), 고동일성 (HOM visibility > 95%) 단광자 생성 소자 개발
- 동시 생성 단광자 확장, 다수 광자 동시 생성 기술 개발 (광자수 16 이상)
- 다중 광자 얽힘 상태 생성 (광자수 10 이상)
- 다중 광자 얽힘 기반 양자 광학 센싱 구현 기술 개발
- 다중 광자 얽힘 기반 양자 센싱 검증 2건 이상

○ 단계별 목표

| 구분               | 단계별 연구목표   |
|------------------|--|
| 1단계<br>(‘25~’27) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고순도, 고동일성 단광자 생성 기술 개발</li> <li>- 동시 생성 단광자 확장, 다수 광자 생성 기술 개발</li> <li>- 다중 광자 양자 상태 정량 평가 기술 개발</li> <li>- 다중 얽힘 광원 생성 기술 개발</li> </ul> |
| 2단계<br>(‘28~’29) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다중 광자 동시 생성 기술</li> <li>- 다중 동일 광자 얽힘 생성 기술</li> <li>- 얽힘광 생성 및 확장 소형 모듈화 기술 개발</li> <li>- 다중 광자 얽힘 기반 양자 광학 센싱 구현</li> </ul>             |
| 3단계<br>(‘30~’32) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고순도, 고동일성을 갖는 다중광자 생성 고도화</li> <li>- 다중 광자 얽힘 기반 양자 광학 센싱 이득 최적화 및 극대화 연구</li> </ul>  |

○ 정량적 연구개발목표

| 성능지표 |                            | 단위 | 연구개발 목표치       |                |                | 연구개발 전<br>국내 수준 | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관)          |
|------|----------------------------|----|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------------------------------|
|      |                            |    | 1단계<br>(25~27) | 2단계<br>(28~29) | 3단계<br>(30~32) |                 |                                |
| 1    | 단광자 순도 $g^{(2)}(0)$        | -  | <0.1           | <0.03          | <0.01          | -               | 0.016<br>U. Vienna /<br>오스트리아  |
| 2    | HOM visibility             | %  | -              | 95             | 98             | -               | -                              |
| 3    | 동시 동일 광자 생성 수*             | 개  | 8              | 16             | 24             | -               | 20 (중국/USTC,<br>SPDC)          |
| 4    | 다중 광자 얽힘 상태**<br>광자수       | 개  | 6              | 10             | 16             | -               | 14 (독일/Max<br>Planck, 원자 기반)   |
| 5    | 다중 광자 얽힘 상태<br>Fidelity*** | -  | 자율<br>제시       | 자율<br>제시       | 자율<br>제시       | -               | 0.76 (독일/Max<br>Planck, 원자 기반) |
| 6    | 다광자 상태 기반 센싱<br>검증****     | 건  | -              | 2              | 3              | -               | -                              |

\* 다수 광자 동시 생성 속도 및 광자 자율 제시 필수, 양자광은 직접 제작해야 함

\*\* 양자 센싱 위한 양자 얽힘 종류 제시 (NOON, GHZ, HB 등) 및 해당 상태에 대한 얽힘 개수 정량 목표 명시 필수

\*\*\* 반드시 도전적으로 제시할 것

\*\*\*\* 표준 양자 한계를 극복하는 정밀도 검증 필수

## 5. 연구내용

### ○ 전체(1~3단계) 연구내용

- ① 고순도, 고동일성 단광자 기술 개발
  - 고순도 ( $g^{(2)}(0) \leq 0.01$ ), 고동일성 (HOM visibility > 98%) 단광자 생성 소자 개발
  - 단광자 소형화 모듈 시작품 개발
- ② 다수 광자 확장 및 얽힘 기술 개발
  - 24 광자 이상 다수 동일 광자 고속 동시 생성 기술
  - 다중 광자 얽힘 측정 기술 개발
  - 16 광자 얽힘 생성 기술 개발
- ③ 양자 얽힘 광원 기반 양자 광학 센싱 응용 연구 (표준 양자 한계를 극복하는 정밀도 검증 필수)
  - 다중 광자 얽힘 기술 및 양자 센싱 이득 극대화 연구
  - 다중 광자 얽힘 기반 양자 광학 센싱 및 이미징 구현 검증

### ○ 1~2단계까지 연구내용

- ① 고순도, 고동일성 단광자 기술 개발
  - 고순도 ( $g^{(2)}(0) \leq 0.03$ ), 고동일성 (HOM visibility > 95%) 단광자 생성 소자 개발
- ② 다중 광자 확장 및 얽힘 기술 개발
  - 16 광자 동일 고속 동시 생성 기술
  - 다중 광자 얽힘 측정 기술 개발
  - 10 광자 얽힘 생성 기술 개발
- ③ 양자 얽힘 광원 기반 양자 광학 센싱 응용 연구 (표준 양자 한계를 극복하는 정밀도 검증 필수)
  - 다중 광자 양자 얽힘 및 양자 상태 정량 평가 기술 개발
  - 다중 양자 얽힘 기반 양자 광학 센싱 및 이미징 구현 검증

## 6. 기대 효과

### ○ 과학기술적 파급효과

- 정밀 계측/측정 기술은 국가의 기반 기술과 국방, 산업과 밀접한 관계를 가지고 있어 과학경쟁력 향상 및 사회 안전망 제공, 기초 과학 연구 전반에 활용 가능.
- 양자 컴퓨팅, 양자 네트워크와 같은 타 양자 응용 기술에도 적용 가능한 원천 기술 확장 기대

### ○ 경제적 파급효과

- 양자 센싱 원천 기술 확보 통한 정밀 센싱/계측시장을 선도 및 초정밀 계측/진단을 요구하는 반도체 산업/의료 산업 등에 큰 파급력 기대

○ 사회적 기대효과

- 바이오 분야 양자 센싱 적용 통한 의료 및 제약 분야 고도화, 산업 분야 양자 센싱 적용 통한 안전 진단 고도화

## 7. 지원기간/예산/추진체계

○ 연구개발기간 : 8년 이내

○ 정부지원연구개발비 : '25년 6.0억원 이내

- 1~2단계까지 정부지원연구개발비 58.53억원 이내
- 3단계까지 총 정부지원연구개발비 86.64억원 이내

※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  | 기간  | 개월수            | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월       |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월       |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월      |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월      |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월      |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월      |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월      |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월      |
| 합계  | -   | 87개월           | 8,664백만원  |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

○ 주관기관 : 제한없음

※ 산업계 참여 권고

|               |   |                   |
|---------------|---|-------------------|
| 연구유형          | 기초연구 ( ○ ), 응용연구 (    ), 개발연구 (    )  | TRL ( 2 )~( 3 )단계 |
| 과제특징          | 경쟁형(    ), 경쟁형(챌린지)(    ), SW자산뱅크등록(    ), 공개SW(    ), 기술료비징수(    ), 국제협력R&D(    ), 정책지정(    ), 혁신도약형(○), 표준화연계(    ), 사회문제해결형(    ), 일자리연계(    ), 소재부품장비(    ), 규제샌드박스(    ), 연구데이터공개(    ), 사업화연계(    ), IP-R&D연계(    ) |                   |
| 구분            |   | 성명                |
| 책임PM(과제기획위원장) |   | 양자 PM             |
| 담당 팀장         |   | 양자기술·산업팀          |
|               |   | 오윤제               |
|               |   | 이민경               |

|  |   |         |
|--|---|---------|
| 관리번호   | 2025-양자센싱-13  | (지정공모형) |
| 기술분류   | 대분류(양자)-중분류(양자 센싱)-소분류(양자 광 센싱)-세분류(양자현미경)          |         |
| 중점분야   | AI( ), AI반도체( ), 5G·6G( ), 양자(√), 메타버스( ), 사이버보안( ) |         |
| 기획유형   | 파괴적혁신기술( ), 초격차신격차( ), 창의도전형R&D( ), 일반R&D( √ )      |         |
| 과제명  | 양자 압착광원을 활용한 초정밀 양자 계측 기술 개발                        |         |
| 1. 개요  |   |         |
| <p>○ (개념) 연속변수 양자광학 기반 양자센싱 기술 중, 여러 광학 모드에서 동시에 높은 순도의 압착을 달성하여 표준 양자 한계를 극복하는 양자센싱 기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고품질 양자 압착광원 생성 및 측정 기술 개발</li> <li>- 압착광 및 연속변수 기반 양자 센싱 최적화 연구</li> <li>- 초정밀 공간/위상 변위 측정 (관성, 양자 AFM, 중력과 등) 및 분산형 양자센싱 원천 기술 개발</li> </ul>  |   |         |
| 2. 현황 및 필요성  |   |         |
| <p>○ (기존 기술현황)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 양자 압착광원을 활용한 물리량 계측은 고전 계측 한계를 뛰어넘는 것이 가능하여 초정밀 계측기술의 구현을 가능케 함. (예: LIGO의 중력과 검출에서 3~6dB 수준의 압착광 활용)</li> <li>- 연속변수 기반의 양자 광원 및 양자 센싱 연구는 현재 실험실 수준의 원리 검증 단계이며, 주로 단일모드 압착광 연구 위주로 진행되고 있음. 다중모드 압착광 기반 분산형 센싱은 초기 연구 단계임</li> </ul> <p>○ (필요성)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연속변수 양자광학 기반 양자센싱 기술은 뛰어난 기술적 가능성과 활용성에도 불구하고 기술 선진국 대비 우리나라의 관련 연구 저변이 특히 미비하여 국내 독자적 연구개발이 시급함. 특히, 70개 모드에서 10dB 압축률을 동시에 달성한 양자광원은 세계적으로도 보고된 바 없는 기술로 성공적 구현시 관련 기술 선도가능</li> <li>- 다중모드 압착광의 공간적 분리를 통해 지리적으로 분산된 센서 노드들 간의 양자상관을 활용한 분산형 양자 센싱이 가능함</li> <li>- 이산변수 양자얽힘은 확률적 생성 과정을 거쳐 성공률이 낮고(<math>\sim 10^{-6}</math>) 복잡한 후선택(post-selection) 과정이 필요한 반면, 연속변수 기반의 양자 광원은 광학적 비선택 과정을 통해 확정적(deterministic) 생성이 가능하여 실용적 양자기술 구현 가능</li> </ul> |   |         |

- 연속변수는 기존 2개 입자 간 bipartite 양자 얽힘을 넘어서 수십 개 모드 간 multipartite 양자 얽힘 상태를 동시에 구현 가능함. 이를 통해 양자정보처리 용량을 기하급수적으로 증가시킬 수 있으며, 단일 광학 시스템에서 대규모 양자 네트워크 구축이 가능
- 연속변수 양자기술은 기존 광통신 인프라와 호환성이 높아 상용화 가능성이 크며, 반도체 웨이퍼 검사, 의료영상 진단, 정밀 가공 공정 모니터링 등 초정밀 측정이 요구되는 다양한 산업 분야에서 즉시 적용 가능한 기술적 파급효과 기대

### 3. 수요분석

#### ○ (주요 수요처)

- 양자광학 연구 대학/연구소, 반도체/디스플레이 정밀검사, 나노급 정밀가공 품질관리 분야
- 고감도 의료영상 진단기기, 생체신호 모니터링 시스템, 신약개발용 분자분석 장비 분야
- 구조물 건전성 모니터링, 지진/환경 감시 시스템, 국방/우주 정밀센서 응용 분야

#### ○ (협력방안)

- 국내외 양자광학 선도 연구기관과 공동연구를 통한 성능 검증 및 새로운 응용분야 발굴
- 주요 제조업체/의료기기업체와 현장 실증을 통한 기술완성도 제고 및 상용화 가속화
- 글로벌 양자기술 컨소시엄 참여, 기술이전/스핀오프 지원을 통한 양자센싱 산업 생태계 조성

### 4. 연구목표

- 본 RFP는 1단계, 2단계, 3단계로 구성되어 있으며, 최종목표는 3단계 목표를 달성하는 것이나 2단계 목표 및 연구내용 달성을 위한 추진방법, 절차, 계획, 추진체계, 산출물 등을 반드시 제시할 것
- 양자과학기술 플래그십 프로젝트 사업의 전체 방향성 및 추가적인 사업 적정성검토 결과에 따라 본 과제는 2단계에서 종료될 수 있으며 3단계를 계속 지원하더라도 연구목표 및 내용, 추진체계, 통폐합 등 연구 전반에 대해 무빙타겟이 적용될 수 있음. 그 외 사항은 국가연구개발혁신법에 따름
- 2단계까지 연구개발은 단계평가 결과에 따라 1단계 후 2단계 연구 지원

#### ○ 최종목표(3단계) : 고품질 양자 압착 광원 생성 및 다중모드 압착광을 활용한 초정밀 양자 광학 센싱 기술 개발

- 고압착비 및 저노이즈 양자 압착 광원 구현 (10 dB 이상)
- 양자 상태 고속, 정밀 특성 평가 기술
- 다중모드 압착광 생성 기술 (70 모드 이상)
- 분산형 양자 센싱 기술 개발
- 압착광 생성 및 측정 모듈 개발
- 압착광 기반 물리량 고전한계 극복 초정밀 측정 기술 및 양자 센싱 검증 시연 1건 이상

○ 2단계 목표 : 고품질 양자 압착 광원 생성 및 연속변수 기반 초정밀 양자 광학 센싱 기술 개발

- 고압착비 및 저노이즈 양자 압착 광원 구현 (8 dB 이상)
- 양자 상태 고속, 정밀 특성 평가 기술
- 다중모드 압착광 생성 기술 (40 모드 이상)
- 분산형 양자 센싱 기술 개발
- 압착광 기반 물리량 고전한계 극복 정밀 측정 기술 및 양자 센싱 검증 시연 1건 이상

○ 단계별 목표

| 구분               | 단계별 연구목표   |
|------------------|--|
| 1단계<br>(‘25~’27) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고압착비 및 저노이즈 양자 압착 광원 구현</li> <li>- 양자 상태 고속, 정밀 특성 평가 기술</li> <li>- 간섭계 기반 정밀 간섭 측정 구현</li> </ul>                     |
| 2단계<br>(‘28~’29) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 양자 압착광 기반의 물리량 고전한계 극복 정밀 측정 기술 개발</li> <li>- 다중모드 압착광 생성 기술 (기존 1단계에서 2단계로 이동)</li> <li>- 분산형 양자 센싱 기술 개발</li> </ul> |
| 3단계<br>(‘30~’32) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 압착광 생성 소형 모듈 및 시작품 개발</li> <li>- 압착광 기반 고전한계 극복 양자 센싱 기술 고도화</li> </ul>   |

○ 정량적 연구개발목표

| 성능지표 |                        | 단위 | 연구개발 목표치       |                |                | 연구개발 전<br>국내 수준 | 세계 최고수준<br>(보유국/보유기관)                  |
|------|------------------------|----|----------------|----------------|----------------|-----------------|--|
|      |                        |    | 1단계<br>(25~27) | 2단계<br>(28~29) | 3단계<br>(30~32) |                 |  |
| 1    | 양자압착 정도                | dB | 8              | 8              | 10             | -               | 15*<br>(막스플랑크<br>연구소/독일)               |
| 2    | 다중모드 압착 모드 수<br>(동시활용) | 모드 | 1              | 40             | 70             | -               | 60**<br>(University of<br>Virginia/미국) |
| 3    | 양자 광학 센싱 실증            | 건  | -              | 1              | 1              | -               | -                                      |

\*15dB 세계 최고 수준은 싱글모드 압착광원이며, 안정적 구현이 어려움. 안정적으로 구현한 싱글모드 압착광원은 12.6dB 수준임. (호주국립대 Opt. Express 30, 37213 (2022).)

\*\*60 모드 압착광의 압축률은 -3.4dB 수준임. (버지니아 대학 Phys. Rev. Lett. 112, 120505 (2014).)

※ 양자광은 직접 제작해야 함

5. 연구내용

○ 전체(1~3단계) 연구내용

① 다중모드 압착광 생성 및 평가 기술

- 고압착비, 저노이즈 압착광원 생성 기술 개발 (10 dB 이상)
- 양자광원 양자 상태 고속 진단 기술 및 모듈화 기술 개발

- 동시간 활용 다중모드 압착광 기술 (70 모드 이상)
- 압착광 생성 소자 모듈화 기술 개발

② 압착광, 연속 변수 기반 초정밀 계측 기술 개발

- 초정밀 공간/위상 변위 측정 (관성, 양자 AFM, 중력과 등) 및 분산형 양자센싱 기술 개발
- 압착광 및 연속변수 기반 양자 광학 센싱 및 이미징 구현 검증 1건 이상

o 1~2단계까지 연구내용

① 다중모드 압착광 생성 및 평가 기술

- 고압착비, 저노이즈 압착광원 생성 기술 개발 (8 dB 이상)
- 양자광원 양자 상태 고속 진단 기술 개발
- 동시간 활용 다중모드 압착광 기술 (40 모드 이상)

② 압착광, 연속 변수 기반 초정밀 계측 기술 개발

- 초정밀 공간/위상 변위 측정 (관성, 양자 AFM, 중력과 등) 기술 개발
- 압착광 및 연속변수 기반 양자 광학 센싱 및 이미징 구현 검증 1건 이상

## 6. 기대 효과

o 과학기술적 파급효과

- 양자 과학경쟁력 향상 및 기초 과학 연구 전반에 활용 가능성 높음.
- 양자 현미경 및 양자 라이다등 활용 뿐만 아니라 양자 컴퓨팅 등의 타 양자 응용 기술에도 적용 가능한 원천 기술 확장 기대

o 경제적 파급효과

- 양자 센싱 원천 기술 확보 통한 정밀 센싱/계측시장을 선도 및 초정밀 계측/진단을 요구하는 반도체 산업/의료 산업 등에 큰 파급력 기대

o 사회적 기대효과

- 물리량 정밀 계측 통한 사회 안전망 제공

## 7. 지원기간/예산/추진체계

o 연구개발기간 : 8년 이내

○ 정부지원연구개발비 : '25년 3.07억원 이내

- 1~2단계까지 정부지원연구개발비 32.17억원 이내

- 3단계까지 총 정부지원연구개발비 46.66억원 이내

※ 3단계(6~8년차)의 정부지원연구개발비는 2단계 종료 후 양자과학기술플래그십 프로젝트 사업의 추가 적정성검토 결과에 따라 조정 제시될 예정임. 또한 연구목표, 내용, 기간 등 주요사항이 통폐합/중단/변경/삭제/추가 등 조정될 수 있음

| 구분  |     | 기간             | 개월수  | 정부지원연구개발비 |
|-----|-----|----------------|------|-----------|
| 1단계 | 1년차 | '25.10월~'26.3월 | 6개월  | 307백만원    |
|     | 2년차 | '26.4월~'26.12월 | 9개월  | 633백만원    |
|     | 3년차 | '27.1월~'27.12월 | 12개월 | 759백만원    |
| 2단계 | 4년차 | '28.1월~'28.12월 | 12개월 | 759백만원    |
|     | 5년차 | '29.1월~'29.12월 | 12개월 | 759백만원    |
| 3단계 | 6년차 | '30.1월~'30.12월 | 12개월 | 483백만원    |
|     | 7년차 | '31.1월~'31.12월 | 12개월 | 483백만원    |
|     | 8년차 | '32.1월~'32.12월 | 12개월 | 483백만원    |
| 합계  |     | -              | 87개월 | 4,666백만원  |

\* 연차별 정부지원연구개발비 및 개월수 등의 사항은 당해연도 예산심의결과에 따라 변동될 수 있음

○ 주관기관 : 제한없음

※ 산업계 참여 권고

|               |   |          |                   |
|---------------|---|----------|-------------------|
| 연구유형          | 기초연구 ( ○ ), 응용연구 (    ), 개발연구 (    )  |          | TRL ( 2 )~( 3 )단계 |
| 과제특징          | 경쟁형(    ), 경쟁형(챌린지)(    ), SW자산뱅크등록(    ), 공개SW(    ), 기술료비징수(    ), 국제협력R&D(    ), 정책지정(    ), 혁신도약형(○), 표준화연계(    ), 사회문제해결형(    ), 일자리연계(    ), 소재부품장비(    ), 규제샌드박스(    ), 연구데이터공개(    ), 사업화연계(    ), IP-R&D연계(    ) |          |                   |
| 구분            |   | 기술분야명/팀명 | 성명                |
| 책임PM(과제기획위원장) |   | 양자 PM    | 오윤제               |
| 담당 팀장         |   | 양자기술·산업팀 | 이민경               |