

RFP관리번호	2025-양자-지정공모형-18		공모유형	지정공모형						
해당여부	<input checked="" type="checkbox"/> 국가전략기술 <input type="checkbox"/> 탄소중립 <input type="checkbox"/> 글로벌 R&D <input type="checkbox"/> 미래소재 <input type="checkbox"/> 전략연구사업(MPX)예정 <input type="checkbox"/> 국방전략기술(예정)									
국책연구기획 평가전문분야1	PM분야	양자	RB분야	전 분야	RB세부분야	전 분야				
국책연구기획 평가전문분야2	PM분야	양자	RB분야	전 분야	RB세부분야	전 분야				
사업명	양자공통기반기술개발									
RFP명	양자시스템 제어를 위한 마이크로파 신호생성 및 처리장치 개발									
RFP유형코드	사업목적·내용	성과물 특성		지원대상	보안과제 분류	일반				
	R	0	-	1						
<b>1. 추진배경</b>										
<p><input type="checkbox"/> 초전도 회로, 다이아몬드 NV 센터, 이온트랩, 실리콘 스핀, 양자점 등 물리적 큐비트 제어를 위한 정밀한 마이크로파 펄스 제어는 양자 시스템의 핵심기술 중 하나</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 첨예해지는 기술패권 전쟁으로 양자기술의 수출이 전면 금지되면 외산 장비에 의존하여 양자컴퓨터를 개발하고 있는 국내에서는 더 연구를 진행할 수 없는 상황이 도래할 수 있음.</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> 양자 시스템 제어에 사용되는 마이크로파 장비는 주요한 양자기술장비로, 국산화하고 원천기술을 확보하는 것이 중요</p> <p>* 국가 간 수출 통제(바세나르체제)가 최근 양자정보기술까지 확대되는 추세임을 고려하였을 때 수입 장비 의존도를 낮추어야 할 필요성이 높아짐</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 큐비트 시스템 연구에 속도가 붙음에 따라 많은 수의 큐비트를 정밀하게 계측하고 제어할 수 있도록 장비의 고도화 요구</li> </ul>										
<b>2. 연구개발목표</b>										
<p><input type="checkbox"/> 최종 목표</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 양자 컴퓨터의 큐비트 제어장치로 적용 가능하며 마이크로파 신호 생성 및 측정 기술, 장비간 동기화 기술을 통해 큐비트 확장이 가능한 장비를 개발하고, 대학 및 연구소의 양자컴퓨터에 적용하여 피드백을 통한 제품 확보</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> 단계별 목표</p> <table border="1"> <tr> <td>1단계('25~'26)</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 마이크로파 생성 하드웨어 시제품 개발</li> <li>- 확장 가능한 구조로 장비간 통합/동기화 기술 개발</li> </ul> </td> </tr> <tr> <td>2단계('27~'29)</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 양자 상태의 제어 및 측정을 위한 소프트웨어 패키지 개발</li> <li>- 국내 연구진에서 사용 중인 하드웨어 장비, 소프트웨어, 패키지와의 연동</li> <li>- 마이크로파 생성 하드웨어 상용장비 개발</li> <li>- 초전도체, 실리콘 반도체, 중성원자, 이온, 다이아몬드 NV센터 등 다양한 양자 컴퓨팅 시스템과 통합 검증</li> </ul> </td> </tr> </table>							1단계('25~'26)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 마이크로파 생성 하드웨어 시제품 개발</li> <li>- 확장 가능한 구조로 장비간 통합/동기화 기술 개발</li> </ul>	2단계('27~'29)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 양자 상태의 제어 및 측정을 위한 소프트웨어 패키지 개발</li> <li>- 국내 연구진에서 사용 중인 하드웨어 장비, 소프트웨어, 패키지와의 연동</li> <li>- 마이크로파 생성 하드웨어 상용장비 개발</li> <li>- 초전도체, 실리콘 반도체, 중성원자, 이온, 다이아몬드 NV센터 등 다양한 양자 컴퓨팅 시스템과 통합 검증</li> </ul>
1단계('25~'26)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 마이크로파 생성 하드웨어 시제품 개발</li> <li>- 확장 가능한 구조로 장비간 통합/동기화 기술 개발</li> </ul>									
2단계('27~'29)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 양자 상태의 제어 및 측정을 위한 소프트웨어 패키지 개발</li> <li>- 국내 연구진에서 사용 중인 하드웨어 장비, 소프트웨어, 패키지와의 연동</li> <li>- 마이크로파 생성 하드웨어 상용장비 개발</li> <li>- 초전도체, 실리콘 반도체, 중성원자, 이온, 다이아몬드 NV센터 등 다양한 양자 컴퓨팅 시스템과 통합 검증</li> </ul>									

### 3. 성과목표

#### □ 연구목표

- 마이크로파 신호 생성과 측정기술을 포함한 큐비트 상태제어 및 측정 장비 개발
- 큐비트 확장이 가능한 장비 간 채널 동기화 기술 개발 및 타장비 연동
- 산학연 공동연구를 통해 실제 양자컴퓨팅 구동 관련 소프트웨어 패키지 및 연구개발
- 사양 (Specification): 아래 제품 사양을 참고로 동등한 수준의 구체적인 사양 제시 필요  
(AWG - Quantum Machines社 OPX1000 장비)
  - 8x analog output, 50 MHz - 10.5 GHz
  - 2x analog input, 1.8 - 10.5 GHz
  - 8x digital markers
  - SFDR > 75 dBc
  - Jitter < 150 fs @ 6 GHz (external clock)
  - Phase noise < -125 dBc/Hz (@ 6 GHz with 10 kHz offset)
  - Active reset < 160 ns(Analog Front-end - Quantum Machines社 Ocatve 장비)
  - Covers the entire range from 2 to 18 GHz
  - 5 upconverters and 2 downconverters
  - 3 independent internal synthesizers and option for up to 5 external synthesizers
  - Ultra-fast switching of output RF signal with high on/off isolation
  - Ultra-fast automated image and LO leakage calibration to > 50 dBc

#### □ 연구내용

- 마이크로파 신호 생성과 측정 기술을 포함한 채널 확장형 장비 개발 및 제품화
  - 양자 상태 제어·측정을 위한 신호 생성 하드웨어 설계 및 제작
  - 양자 상태 제어·측정을 위한 소프트웨어 설계 및 제작
  - 양자 상태 측정을 위한 신호처리 기법 개발
  - 양자 상태 측정 데이터 분석 알고리즘 개발
- 큐비트 확장이 가능한 장비 간 채널 동기화 기술 개발 및 타장비 연동
  - 수백 큐비트 실험구성이 가능한 장비간 동기화 기술 개발
  - QC 장비간 채널 동기화 정의: 큐비트 제어 채널 즉 Analog 포트의 확장을 위한 동기화를 의미하며 채널 간의 시간차를 나타냄. 예를 들어, 채널이 장비당 8개일 경우 50큐비트를 달성하기 위해 7개의 장비가 필요
  - 예를 들어, Zurich Instruments, Quantum Machines 등과 같이 국내외 양자컴퓨팅 개발진 및 연구진이 일반적으로 사용하는 하드웨어 제품과의 연동(구체적인 제품명과 연동방식은 과제수행자가 제시)

- 산학연 공동연구를 통하여 실제 양자컴퓨터 구동을 위한 소프트웨어 패키지 및 연구개발 레퍼런스 확보
  - 양자컴퓨팅 연구개발에 필수적으로 구현이 되어야 하는 복합 기능(ex. Pauli Operator, CNOT gate, Rabi oscillation 실험, 양자 상태 측정 후 feed-forward 기능 등)이 소프트웨어 패키지를 통해서 구현되어야 함 (구체적인 기능과 구현 방식은 과제수행자가 제시)
  - 현재 국내에서 개발 중인 다양한 양자컴퓨팅 시스템 중 2개 이상의 다른 플랫폼을 선택하여 실제 양자컴퓨팅 환경에서 레퍼런스 확보 (과제수행자가 직접 플랫폼 선정)
  - 예를 들어, PennyLane, CUDA-Q, Qiskit 등과 같이 국내외 양자컴퓨팅 개발진 및 연구진이 일반적으로 사용하는 소프트웨어 패키지와의 연동 (구체적인 패키지명과 연동방식은 과제수행자가 제시)

□ 연차별 연구 목표 및 내용

	연구목표 및 연구내용	주요 성과물
1단계 (‘25~‘26)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 양자 상태 조작이 가능한 신호 생성 및 측정 하드웨어 설계</li> <li>• RF 부품 레벨 구성 설계</li> <li>• 신호 생성 및 측정용 하드웨어 장비 제작</li> <li>• 장비간 양자 상태 제어 신호 동기화 기술 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 신호 생성/측정 회로설계 도면</li> <li>• RF 구성 도면</li> <li>• 신호 생성 및 측정 전자 회로</li> <li>• 시각 동기화 회로 설계도</li> </ul>
2단계 (‘27~‘29)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 양자 상태 조작이 가능한 하드웨어를 제어하는 소프트웨어 설계</li> <li>• 양자 상태 측정을 위한 소프트웨어 설계</li> <li>• 양자 상태 제어 및 측정용 상위 소프트웨어 라이브러리 설계</li> <li>• 하드웨어 소프트웨어 통합 테스트 및 검증</li> <li>• 하드웨어 및 소프트웨어 최적화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 신호 생성 및 측정용 소프트웨어 코드 및 문서</li> <li>• 소프트웨어 라이브러리</li> <li>• 성능 검증 기술 문서</li> </ul>

4. 지원기간/예산/추진체계

- 기간: 2025.07.01.~2029.12.31.
- 정부지원연구개발비: 8,000,000천원( ‘25년도 7.39억원, 6개월분)

구분	‘25년도	‘26년도	‘27년도	‘28년도	‘29년도	합계
예산 (백만원)	739	1,815	1,815	1,815	1,815	8,000

- ※ 단계 평가에 따른 과제 중단 및 연구비 조정 가능
- ※ 연차별 사업 기간 및 연구비는 정부예산 사정에 따라 변경될 수 있음

- 과제형태: (일반)연구개발과제
- 주관연구개발기관: 대학/출연(연)/기업부설연구소 등
- 기술료 징수여부: 징수

5. 특기사항

- 연구과제 국내기업 참여 필수(공동/위탁연구개발기관)
- 과제 신청 시, 개발 제품에 대한 사업화 로드맵 포함 필수
- 최종 개발 제품에 사용되는 부품의 국산화율이 높은 과제 선정 평가 시 우대

RFP관리번호	2025-양자-지정공모형-19		공모유형	지정공모형		
해당여부	<input checked="" type="checkbox"/> 국가전략기술 <input type="checkbox"/> 탄소중립 <input type="checkbox"/> 글로벌 R&D <input type="checkbox"/> 미래소재 <input type="checkbox"/> 전략연구사업(MPX)예정 <input type="checkbox"/> 국방전략기술예정					
국책연구기획 평가전문분야1	PM분야	양자	RB분야	전 분야	RB세부분야	전 분야
국책연구기획 평가전문분야2	PM분야	양자	RB분야	전 분야	RB세부분야	전 분야
사업명	양자공통기반기술개발					
RFP명	극저온 마이크로파 신호 증폭기 개발					
RFP유형코드	사업목적·내용	성과물 특성		지원대상	보안과제 분류	일반
	R	0	-	1		
<b>1. 추진배경</b>						
<p><input type="checkbox"/> 극저온 마이크로파 양자시스템은 양자컴퓨팅, 양자센싱 및 계측, 전파 천문학, 암흑물질 연구 등 다양한 응용분야에서 활용될 수 있으며, 다수의 마이크로파 양자시스템의 양자상태를 짧은 시간내에 높은 신뢰도로 측정하기 위해서는 mK - 4 K 절대온도의 극저온 환경에서 미세한 마이크로파 신호를 증폭할 수 있는 <b>저잡음, 초소형, 고집적 극저온 마이크로파 부품 기술</b>이 요구됨.</p> <p>○ GHz 마이크로파 대역의 양자 시스템은 열잡음으로 인한 양자정보 손실을 최소화하기 위해 수십 밀리켈빈(millikelvin) 온도의 극저온(<math>\hbar\omega \ll k_B T</math>) 환경에서 동작함. 마이크로파 양자상태의 정확한 판독(readout)을 위해서는 수-수십 개의 마이크로파 광자 수준의 미세한 양자 신호를 측정하기 위한 극저온 저잡음 마이크로파 신호 증폭 기술 확보가 필수적임.</p> <p><input type="checkbox"/> 극저온 환경의 마이크로파 신호의 증폭은 고전적으로 HEMT(High Electron Mobility Transistor) 기반의 저잡음 증폭기(Low Noise Amplifier; LNA)가 사용되어 왔으며, 극저온 냉각기 내의 4 K 환경에서 높은 증폭 이득 성능의 외산 상용 제품이 판매 중.</p> <p>○ 저잡음 극저온 HEMT 증폭기는 현재 대표적으로 스웨덴의 Low Noise Factory사 등에서 공급하고 있음. 국내에는 극저온 마이크로파 소재, 부품 연구 개발이 아직 초기단계에 머물러 있어 해외 기술에 상당 부분 의존하고 있음. 미래 양자기술 산업에서 경쟁력 확보를 위해서는 극저온 HEMT 증폭기 기술의 국산화가 요구됨.</p> <p><input type="checkbox"/> 고성능 마이크로파 양자상태 측정을 위해서는 HEMT에 더하여 조셉슨 파라메트릭 증폭기(Josephson Parametric Amplifier)와 같은 양자한계 증폭기(Quantum Limited Amplifier)의 활용이 필수적임.</p> <p>○ 일반적인 조셉슨 파라메트릭 증폭기는 특정 공진주파수에서만 작동되어 주파수 밴드폭이 수-수십 MHz로 작아 다른 주파수 대역의 마이크로파 양자 상태를 동시에 판독하기 어려운 한계점이 존재함</p> <p>○ 2015년 UC Berkely와 MIT Lincoln Laboratory의 주도로 수백-수천 개의 조셉슨 접합의 배열로 구성된 조셉슨 진행파 파라메트릭 증폭기(Josephson Travelling-Wave Parametric</p>						

Amplifier; JTWPA)의 개발이 최초로 보고 되었음. 이러한 증폭기는 mK의 극저온 환경에서 작동하며, 1 GHz 이상의 증폭 주파수 대역폭, 양자한계 근접 증폭 잡음 성능 등의 특성을 보유함. 이러한 JTWPA는 대규모 양자프로세서내 다중 큐비트 동시 관독을 위한 주파수 멀티플렉싱(Multiplexing) 기법을 활용하기 위한 필수적인 부품 요소이며, 냉각기 내 마이크로파 부품 및 케이블의 수를 최소화 할 수 있음.

- 현재 네덜란드의 Quantware, 프랑스의 Silent Waves, 핀란드의 VTT 등에서 상용 JTWPA를 개발 및 공급하고 있는 것으로 알려져 있음.

## 2. 연구개발목표

### □ 최종 목표

- GHz 마이크로파 대역의 양자상태의 고성능 관독에 필수적인 HEMT 기반의 극저온 RF 저잡음 증폭기(LNA) 및 양자한계 조셉슨 진행파 파라메트릭 증폭기(JTWPA) 기술을 독자적으로 확보하여 미래 양자기술 산업분야의 경쟁력 제고를 목표로함

### □ 단계별 목표

1단계('25~'26)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ HEMT 제작을 위한 III-V 물질 플랫폼(InP, AlGaAs, GaN 등) 선정</li> <li>○ HEMT 회로, 소자 구조 설계 및 제작 공정 수행</li> <li>○ 저잡음 HEMT 기반 LNA MMIC 모듈 및 극저온 패키징 초기 프로토타입 제작 및 극저온 특성 평가</li> <li>○ JTWPA 회로, 소자 구조 설계 및 제작 공정 기술 개발</li> <li>○ JTWPA 조셉슨 접합 배열 제작 공정 최적화 및 조셉슨 접합 극저온 특성 평가</li> </ul>
2단계('27~'29)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 저잡음 HEMT 기반 RF LNA MMIC 모듈 및 극저온 패키징 최적화, 고도화 및 극저온 특성 평가</li> <li>○ HEMT LNA의 극저온 성능 신뢰성 평가 수행</li> <li>○ 극저온 마이크로파 대역 양자소자 등을 통한 HEMT LNA 성능 벤치마킹 수행</li> <li>○ JTWPA 극저온 패키징 초기 프로토타입 개발 및 극저온 특성 평가</li> <li>○ JTWPA 회로 구조, 소자 공정, 극저온 패키징 최적화 및 고도화</li> <li>○ JTWPA 극저온 성능 신뢰성 평가 수행</li> <li>○ HEMT 및 JTWPA 시제품 제작 및 마이크로파 소자에 적용을 통한 양자상태 관독 성능 시연</li> </ul>

## 3. 성과목표

### □ 연구목표

- 4-8 GHz 마이크로파 주파수 대역의 극저온 양자소자의 다중 마이크로파 양자상태 관독을 위한 HEMT 기반의 극저온 마이크로파 저잡음 증폭기(LNA) 개발 및 시제품 확보.
- 조셉슨 접합의 1차원 배열로 구성된 양자한계 조셉슨 진행파 파라메트릭 증폭기(JTWPA) 개발 및 시제품 확보.
- 개발된 HEMT 및 JTWPA를 이용한 마이크로파 대역의 양자상태 고성능 관독 구현.

□ 연구내용

- HEMT 기반 극저온 마이크로파 저잡음 증폭기(LNA) 기술 개발
  - HEMT 기반 Cryo-LNA IC 설계, 제작, 극저온 패키징 기술 개발
  - 극저온 환경에서의 III-V HEMT 특성 평가, 모델링 기술 개발
  - 양자기술 실험에 실장 가능한 HEMT 기반 LNA 시제품 개발 및 시연
- 양자한계 수준의 조셉슨 진행과 파라메트릭 증폭기(JTWPA) 기술 개발
  - 넓은 대역폭 신호 증폭을 위한 비선형 위상정합 (nonlinear phase-matching) 조건 설계
  - 조셉슨 접합 배열 제작 공정 기술 개발 및 최적화
  - JTWPA 제작, 극저온 패키징 및 극저온 성능 평가 기술 개발
  - 양자기술 실험에 실장 가능한 TWPA 시제품 개발 및 시연

□ 연차별 연구 목표 및 내용

연도	연구목표	주요성과물
1단계 (‘25~‘26)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ HEMT 제작을 위한 III-V 물질 플랫폼(InP, AlGaAs, GaN 등) 선정</li> <li>○ HEMT 회로, 소자 구조 설계 및 제작 공정 수행</li> <li>○ 저잡음 HEMT 기반 LNA MMIC 모듈 및 극저온 패키징 초기 프로토타입 제작 및 극저온 특성 평가</li> <li>○ JTWPA 회로, 소자 구조 설계 및 제작 공정 기술 개발</li> <li>○ JTWPA 조셉슨 접합 배열 제작 공정 최적화 및 조셉슨 접합 극저온 특성 평가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ HEMT 기반 극저온 저잡음 RF LNA MMIC 모듈 설계/제작/평가 기술                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 작동 온도: 4 K 근방</li> <li>- 작동 주파수 대역: 4-8GHz</li> <li>- 잡음온도: &lt; 8 K,</li> <li>- 증폭 이득: &gt;30 dB</li> <li>- 소모전력: &lt; 30 mW</li> </ul> </li> <li>○ 1 GHz 대역폭 수준의 신호증폭을 위한 JTWPA 비선형 위상정합 조건 설계 및 소자 모델링</li> <li>○ JTWPA 제작을 위한 조셉슨 접합 배열 제작 기술</li> </ul>
2단계 (‘27~‘29)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 저잡음 HEMT 기반 RF LNA MMIC 모듈 및 극저온 패키징 최적화, 고도화 및 극저온 특성 평가</li> <li>○ HEMT LNA의 극저온 성능 신뢰성 평가 수행</li> <li>○ 극저온 마이크로파 대역 양자소자 등을 통한 HEMT LNA 성능 벤치마킹 수행</li> <li>○ JTWPA 극저온 패키징 초기 프로토타입 개발 및 극저온 특성 평가</li> <li>○ JTWPA 회로 구조, 소자 공정, 극저온 패키징 최적화 및 고도화</li> <li>○ JTWPA 극저온 성능 신뢰성 평가 수행</li> <li>○ HEMT 및 JTWPA 시제품 제작 및 마이크로파 소자에 적용을 통한 양자상태 관측 성능 시연</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 극저온 저잡음 RF LNA MMIC 모듈 설계/제작/평가 기술                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 작동 온도: 4 K 근방</li> <li>- 작동 주파수 대역: 4-8GHz</li> <li>- 잡음온도: &lt; 2 K,</li> <li>- 증폭 이득: &gt;40 dB</li> <li>- 소모전력: &lt; 10 mW</li> </ul> </li> <li>○ JTWPA 극저온 패키징 초기 프로토타입 제작 및 특성평가                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 작동 온도: &lt;50 mK</li> <li>- 작동 주파수 대역: 4-8GHz</li> <li>- 주파수 대역폭: &gt;500 MHz</li> <li>- 증폭 이득 평균: &gt; 15 dB</li> </ul> </li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quantum efficiency: &gt; 40%</li> <li>○ JTWPA 극저온 패키징 고도화 및 특성평가 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 작동 온도: &lt;50 mK</li> <li>- 작동 주파수 대역: 4-8GHz</li> <li>- 주파수 대역폭: &gt;1 GHz</li> <li>- 증폭 이득 평균: &gt; 18 dB</li> </ul> </li> <li>- Quantum efficiency: &gt; 50%</li> <li>- Saturation power: &gt; -100 dBm</li> <li>○ HEMT 및 JTWPA의 극저온 신뢰성 평가를 위한 시스템 및 프로토콜 확립</li> <li>○ HEMT LNA 및 JTWPA 시제품 시연</li> </ul>
--	--	---

**4. 지원기간/예산/추진체계**

- 기간: 2025.07.01.~2029.12.31.
- 정부지원연구개발비: 8,000,000천원( '25년도 7.39억원, 6개월분)

구분	'25년도	'26년도	'27년도	'28년도	'29년도	합계
예산 (백만원)	739	1,815	1,815	1,815	1,815	8,000

- ※ 단계 평가에 따른 과제 중단 및 연구비 조정 가능
- ※ 연차별 사업 기간 및 연구비는 정부예산 사정에 따라 변경될 수 있음

- 과제형태: (일반)연구개발과제
- 주관연구개발기관: 대학/출연(연)/기업부설연구소 등
- 기술료 징수여부: 징수

**5. 특기사항**

- 연구과제 국내기업 참여 필수(공동/위탁연구개발기관)
- 과제 신청 시, 개발 제품에 대한 사업화 로드맵 포함 필수
- 양자컴퓨팅 연구에 사용 가능한 수준의 Cryo-LNA, TWPA 시제품 제작 필요
- HEMT 및 JTWPA 개발에 필요한 소재 플랫폼 확보, 제작 공정 수행을 위한 구체적인 추진 전략 및 추진체계 제시 필요

RFP관리번호	2025-양자-지정공모형-20		공모유형	지정공모형		
해당여부	<input checked="" type="checkbox"/> 국가전략기술 <input type="checkbox"/> 탄소중립 <input type="checkbox"/> 글로벌 R&D <input type="checkbox"/> 미래소재 <input type="checkbox"/> 전략연구사업(MPX)예정 <input type="checkbox"/> 국방전략기술예정					
국책연구기획 평가전문분야1	PM분야	양자	RB분야	전 분야	RB세부분야	전 분야
국책연구기획 평가전문분야2	PM분야	양자	RB분야	전 분야	RB세부분야	전 분야
사업명	양자공통기반기술개발					
RFP명	양자 큐비트 생성 및 측정을 위한 양자소재 성장 및 이종소재 집적화 기술 개발					
RFP유형코드	사업목적·내용	성과물 특성		지원대상	보안과제 분류	일반
	R	0	-	1		

**1. 추진배경**

- 양자과학기술이 전세계 주요국에서 전략기술로 인식되며 정책적 지원과 R&D 투자가 증가하고 있고 기술패권 경쟁이 심화되고 있음. 특히 해당 분야의 소재, 부품, 장비에 대한 수출규제가 점차 강화되고 있는 추세임.
- 이런 환경에서 국내 양자과학기술이 선도적인 연구로 진화하기 위해서는 양자기술 연구 및 산업에 필요한 소재, 부품, 장비에 대한 해외 의존도를 낮추고 자립적인 생태계를 구축하는 것이 필요.
- 그러나, 국내는 소재 기술의 기본 역량을 보유하고 있지만, 양자 소재에 대한 연구 및 개발은 아직 미비한 실정. 예를 들어, 큐비트를 생성하고 측정하는 양자시스템을 지원하는 소재는 해외 소재 업체에 의존하고 있음. 또한 양자 시스템 개발을 위한 큐비트를 전달하고 측정하기 위한 소자를 집적화하는 기술은 연구가 미미한 상황임.
- 따라서, 양자 소재 성장 기술, 측정 및 분석 기술, 이종 소재간의 집적화 기술들과 같이 양자 소재 기술 전반에 활용될 수 있는 기술을 체계적으로 통합 개발하는 연구를 통해 원천기술을 확보하는 것이 시급함. 또한 국내 양자소재 공급처를 확보하고 이를 통해 국내 양자생태계 자립에 도움이 되는 연구개발이 시급히 필요함. 특히 현재 국내에서는 양자 소재 성장 및 가공에 특화된 공정장비 연구개발이 전무한 상태이며 대부분 외산장비에 의존하고 있어 관련 생태계 조성을 위해 국산화가 시급함.
- MBE(분자빔 에피택시) 성장 기술의 경우 III-V족(GaAs 계), Si(C) 및 산화물/질화물과 같은 다양한 반도체 소재를 고품위로 성장시킬 수 있어 광자 큐비트 및 스핀 큐비트 생성 및 측정 연구에 직접적으로 활용될 수 있으며, 초전도/trapped ion/중성 원자 큐비트 관련 양자소재연구에 응용될 수 있음. CVD (Chemical vapor depositon) 성장 기술의 경우 초고순도 다이아몬드 성장에 응용되어 점결함 기반의 양자큐비트 응용에 활용될 수 있음. PVD(Physical vapor depositon) 성장 기술의 경우 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>과 같은 초저손실 광학소재와 NbN과 같은 양자 측정 소재로 활용될 수 있음. RIE(Reactive Ion Etching) 장비의 경우 도파로 식각과 같은 미세 공정에 활용되어 집적화 기술에 응용될 수 있음.

## 2. 연구개발목표

○ 최종 목표 : 양자소재를 고품질로 성장할 수 있는 기술 및 장비를 개발하고, 이중 양자 소재간의 집적화를 통해 큐비트 생성/전달/측정에 활용될 수 있는 양자 소자 집적화 기술을 개발함.

### ○ 단계별 목표

단계	연구목표
1단계('25~'26)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 3종 이상의 고품위 큐비트 생성/전달/측정 관련 양자 소재 성장 기술 개발</li> <li>○ 양자 소재의 품질 평가 기술 개발</li> </ul>
2단계('27~'29)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 양자 소재 품질의 고도화</li> <li>○ 이중 양자 소재의 집적화</li> <li>○ 양자 소재를 이용한 큐비트 생성/측정 활용가능 양자 소자 개발</li> <li>○ 2종 이상의 소재가 집적화된 큐비트 소자 제작</li> <li>○ 고품위 양자 소재 성장 또는 가공 가능 공정 장비 기술 개발</li> </ul>

## 3. 성과목표

### ○ 단계별 연구내용 및 성과목표

단계	연구내용	성과목표
1단계 ('25~'26)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 3종 이상의 고품위 큐비트 생성/전달/측정 관련 양자 소재 성장 기술 개발</li> <li>○ 양자 소재의 품질 평가 기술 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 큐비트 생성 소재(다이아몬드, SiC, 반도체 기반 양자점 등): 큐비트를 생성하고 양자 연구에 사용할 수 있는 소재의 성장 기술 개발(소재의 목표 품질 자율 제시) [예시1: 다이아몬드 단결정, 질소불순물 밀도 <math>[N_s^0] &lt; 100\text{ppb}</math>, 보론불순물 밀도 <math>[B] &lt; 50\text{ppb}</math> [예시2: 대역 양자 광원용 저밀도 양자점, 양자점 밀도 <math>&lt; 10 \text{ QD}/\mu\text{m}^2</math>, <math>g(2) &lt; 0.1</math>]</li> <li>○ 큐비트 전달 소재(<math>\text{Ta}_2\text{O}_5</math>, <math>\text{LiNbO}_3</math> 등): 큐비트를 전달하기 위한 초전손실용 광학소재의 성장 기술 개발 (소재의 목표 품질 자율 제시) [예시: 직성장 <math>\text{Ta}_2\text{O}_5</math> 박막 굴절율 <math>&gt; 2.1</math>, IR 영역 선평 <math>1\mu\text{m}</math> 이하 도파로 <math>&lt; 0.5 \text{ dB}/\text{cm}</math>]</li> <li>○ 큐비트 측정 소재(NbN 등) : 큐비트 측정을 위한 SNSPD용 초전도 박막 등의 성장 기술 개발 (소재의 목표 품질 자율 제시) [예시: NbN 박막 (두께 <math>50\text{nm}</math> 이하)의 <math>T_c &gt; 10\text{K}</math>], 직경 2인치 이상]</li> <li>○ 양자소재 평가 기술 개발(성과 목표 자율 제시): [큐비트 생성 소재 예시: 큐비트의 양자 수명 측정 기술 개발] [큐비트 전달 소재 예시: 도파로 내부에서의 손실 측정 기술 개발] [큐비트 측정 소재 예시: 극저온 환경에서 <math>T_c</math> 측정 기술 개발]</li> </ul>

<b>2단계</b> <b>(‘27~‘29)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 양자 소재 품질의 고도화</li> <li>○ 이종 양자 소재의 집적화</li> <li>○ 양자소재를 이용한 큐비트 생성/측정 활용가능 양자 소자 개발</li> <li>○ 2종 이상의 소재가 집적화된 양자 소자 제작</li> <li>○ 고품위 양자 소재 성장 또는 가공 가능 공정 장비 기술 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 양자 소재 품질의 고도화 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 큐비트 생성 소재 품질 고도화 (다이아몬드, SiC, 반도체 기반 양자점 등):(소재의 목표 품질 자율 제시)  [예시1: 다이아몬드 단결정, 질소불순물 밀도 <math>[N_s^0] &lt; 10\text{ppb}</math>, 보론불순물 밀도 <math>[B] &lt; 5\text{ppb}</math>  [예시2: 대역 양자 광원용 저밀도 양자점, 양자점 밀도 <math>&lt; 1 \text{ QD}/\mu\text{m}^2</math>, <math>g(2) &lt; 0.01</math></li> <li>- 큐비트 전달 소재 품질 고도화(<math>\text{Ta}_2\text{O}_5</math>, <math>\text{LiNbO}_3</math> 등): (소재의 목표 품질 자율 제시)  [예시: 직성장 <math>\text{Ta}_2\text{O}_5</math> 6인치 균일도 3% 이내, IR 영역 선폭 <math>1\mu\text{m}</math> 이하 도파로 전송손길 <math>&lt; 0.3\text{dB}/\text{cm}</math></li> <li>- 큐비트 측정 소재 품질 고도화 (NbN 등): (소재의 목표 품질 자율 제시)  [예시: NbN 박막(두께 10nm 이하)의 <math>T_c &gt; 10\text{K}</math>, 직경 3인치 이상]</li> </ul> </li> <li>○ 이종 양자 소재의 집적화:큐비트 생성+전달, 전달+측정 등을 위한 이종 접합 양자 소재 개발 (성과지표 자율제시)  [예시: 큐비트측정소재(직성장 NbN, 전사 2D hBN)와 큐비트전달소재(<math>\text{LiNbO}_3</math>, <math>\text{Ta}_2\text{O}_5</math>) 기반 이종접합구조 소재]</li> <li>○ 양자소재를 이용한 큐비트 생성/측정 활용 가능 양자 소자 개발 (성과지표 자율제시) <ul style="list-style-type: none"> <li>-큐비트 생성 소자  [예시 : 다이아몬드 NV센터 기반의 큐비트 생성 소자, <math>T_2 &gt; 10\mu\text{s}</math></li> <li>-단일광자 측정 소자  [예시: SNSPD, <math>J_c &gt; 6\text{MA}/\text{cm}^2</math> @5K relaxation time <math>&lt; 50\text{ps}</math>]</li> </ul> </li> <li>○ 2종 이상의 소재가 집적화된 양자 소자 제작</li> <li>○ 고품위 양자 소재 성장 또는 가공 가능 공정 장비 기술 개발 (성과지표 자율제시)  [예시1: 질소불순물 밀도 <math>[N_s^0] &lt; 50\text{ppb}</math> 및 <math>15\text{nm}/\text{min}</math> 이하 저속 증착 가능 CVD 공정 장비]  [예시2: 산화물 식각을 위한 식각 균일도@200mm 3%이하 RIE 공정장비]</li> </ul>
--------------------------------	--	--

**4. 지원기간/예산/추진체계**

- 기간: 2025.07.01.~2029.12.31.
- 정부지원연구개발비: 8,000,000천원( ‘25년도 7.39억원, 6개월분)

구분	‘25년도	‘26년도	‘27년도	‘28년도	‘29년도	합계
예산 (백만원)	739	1,815	1,815	1,815	1,815	8,000

- ※ 단계 평가에 따른 과제 중단 및 연구비 조정 가능
- ※ 연차별 사업 기간 및 연구비는 정부예산 사정에 따라 변경될 수 있음

- 과제형태: (일반)연구개발과제
- 주관연구개발기관: 대학/출연(연)/기업부설연구소 등
- 기술료 징수여부: 징수

## 5. 특기사항

- 과제 신청 시, 개발 제품에 대한 사업화 로드맵 포함 필수
- 연구과제 국내기업 참여 필수(공동/위탁연구개발기관)
  - 국내 양자 기술 산업 생태계 기반을 조성하기 위하여 소재 전문 기업의 참여 필수.  
대면적 양자 소재 박막 시제품 개발
  - 사업 종료후 과제컨소시엄 보유 장비를 통해 국내 소재 업체가 관련 공정을  
진행하여 국내 양자 소재/소자 수요처에 공급할 수 있는 후속 로드맵 제시
  - 장비 및 장비 부품 국산화 적용 시 우대
- '25년도 양자공통기반기술개발사업 신규과제는 1개 RFP당 1개 과제만 지원 가능

RFP관리번호	2025-양자-지정공모형-21		공모유형	지정공모형		
해당여부	<input checked="" type="checkbox"/> 국가전략기술 <input type="checkbox"/> 탄소중립 <input type="checkbox"/> 글로벌 R&D <input type="checkbox"/> 미래소재 <input type="checkbox"/> 전략연구사업(MPX)예정 <input type="checkbox"/> 국방전략기술예정					
국책연구기획 평가전문분야1	PM분야	양자	RB분야	전 분야	RB세부분야	전 분야
국책연구기획 평가전문분야2	PM분야	양자	RB분야	전 분야	RB세부분야	전 분야
사업명	양자공통기반기술개발					
RFP명	큐비트 컨트롤을 위한 레이저 시스템 개발					
RFP유형코드	사업목적·내용	성과물 특성		지원대상	보안과제 분류	일반
	R	0	-	1		
<b>1. 추진배경</b>						
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 양자컴퓨터를 개발하기 위해 다양한 플랫폼 및 기술들이 사용되고 있음. 특히 단일 원자/이온/분자 어레이를 이용한 양자 컴퓨터 개발에 초정밀 연속파 레이저 및 광주파수 빔살 기술이 필수 공통 기반 기술임. 따라서 정밀하고 안정적인 큐비트 상태의 생성, 초기화, 제어, 및 측정에 필요한 초정밀 연속파 레이저, 펄스 레이저, 다파장 레이저 주파수 측정 및 안정화를 위한 광주파수 빔살 기술은 원자/이온/분자 기반 양자 컴퓨터 개발에 필수적인 핵심 기반 기술임.</li> <li>○ 원자/이온/분자 기반 양자 컴퓨터 연구에서 연속파 레이저 및 펄스 레이저의 주파수, 위상, 진폭, 반복율 등을 시간 또는 주파수 영역에서 안정화하거나, 개별 시스템 요구에 따라 시간 및 공간 해상도로 정밀하게 제어하는 것은 단일 및 두 큐비트 양자 게이트의 신뢰도 확보에 필수적임.</li> <li>○ 연속파 단일 주파수 레이저, 펄스 레이저(적외선/가시광/자외선)는 단일 및 두 큐비트 제어 및 얽힘 생성에 사용되며, 광주파수 빔살은 원자/이온/분자 기반 양자 플랫폼에 사용되는 각종 레이저의 주파수 동시 안정화 및 측정에 필수 장비임. 연속파 단일 주파수 레이저, 펄스 레이저, 광주파수 빔살 시스템 및 레이저 안정화 시스템은 연구실에서 양자 산업계로 기술 확산을 위해 반드시 확보해야 할 공통 기반 기술임.</li> <li>○ 위에 제시된 기술들은 모두 고가의 기술/제품들로 해외에 전적으로 의존하거나 개별 실험실에서 부분적으로 개발 또는 사용 중임. 따라서, 단일 원자/이온/분자 어레이 기반 고품질 큐비트 생성, 측정, 컨트롤을 위한 연속파 레이저, 펄스 레이저, 광주파수 빔살의 주파수 안정화 시스템은 1, 2차원 원자/이온/분자 큐비트 어레이 플랫폼에서 단일 및 두 큐비트 게이트 컨트롤에 필요한 레이저 장비로서 국내 기술로 개발하고 모듈화하는 것은 국내 양자공통기반기술 발전에 필수적임.</li> </ul>						
<b>2. 연구개발목표</b>						
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 최종 목표 : 원자/이온/분자 양자 컴퓨터의 단일 및 두 개 이상의 큐비트 초기화, 컨트롤 및 얽힘 생성을 위한 초정밀 연속파 단일 주파수 레이저 (자외선/가시광/자외선) 시스템, 펄스 레이저 시스템, 광주파수 빔살 (모드잠금 레이저) 시스템 및 레이저 안정화 시스템 개발</li> </ul> <p><b>※ 최종 목표 中 2개 이상의 레이저 시스템 개발 필수</b></p>						

○ 단계별 목표

1단계 (‘25~‘26)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 연속파 레이저 시스템 개발(레이저 헤드 및 컨트롤러)</li> <li>• 모드 잠금 펄스 레이저 시스템 설계</li> <li>• 연속파 레이저 주파수 안정화용 초공진기 개발</li> <li>• 하모닉 발생 기술(SHG) 이용 고출력 레이저 개발</li> <li>• 레이저 시스템 검증을 위한 큐비트 시스템 개발</li> </ul>
2단계 (‘27~‘29)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 모드 잠금 펄스 레이저 시스템 개발</li> <li>• 광 빔살 시스템 개발 및 레이저 안정화 기술 개발</li> <li>• 초공진기를 이용한 연속파 레이저 안정화 시스템 개발</li> <li>• 모드 잠금 펄스 레이저 안정화 시스템 개발</li> <li>• 큐비트 시스템을 통해 개발된 레이저 시스템의 성능 검증</li> </ul>

3. 성과목표

○ 연구목표: 원자/이온/분자 기반 1, 2차원 어레이 양자 플랫폼 내 개별 큐비트 생성, 양자상태 측정 및 제어, 두 큐비트 얽힘 생성 및 컨트롤을 위한 연속파 레이저, 모드 잠금 펄스 레이저, 초공진기 개발 및 레이저 안정화 시스템 개발. 개발한 레이저를 사용하여 큐비트의 측정 및 제어, 얽힘 생성 구현.

	연구목표 및 내용	주요 성과물(예시)
1단계 (‘25~‘26)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 파장가변 연속파 레이저 시스템개발</li> <li>• 레이저 검증용 큐비트 시스템 개발</li> <li>• 고품질 큐비트 제어용 PDH 주파수 안정화 초공진기 시스템 개발</li> <li>• 모드잠금 펄스 레이저 설계</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 레이저 주파수, 출력, 선폭, 반복률, 초공진기의 특성은 현 상용화 제품의 성능 및 목표 큐비트 시스템에 맞추어 과제 제안자가 제안 가능</li> <li>• 파장가변 연속파 레이저 (출력 &gt; 100 mW, 파장 780nm, 선폭 &lt; 100 Hz, mod hop free range &gt; 10GHz, 레이저 컨트롤러 포함)</li> <li>• 초공진기 시스템 (ULE cavity, F &gt; 300,000, FSR 1.5 GHz, 피네스 &gt; 300,000)</li> <li>• 하모닉 발생 기술(SHG) 이용 고출력 레이저 - Power &gt; 1W)</li> </ul>
2단계 (‘27~‘29)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1단계에서 제작한 초공진기 및 단일 주파수 연속파 레이저와 PDH 주파수 안정화 방법을 이용한 선폭 &lt; 10 Hz를 갖는 주파수 안정화 레이저 시스템 개발</li> <li>• 120 MHz 반복률 모드 잠금 펄스 레이저 개발 및 주파수 안정화 시스템 개발</li> <li>• 광주파수 빔살을 이용한 레이저 주파수 안정화 시스템 개발</li> <li>• 단일 또는 두 개 이상의 큐비트 초기화/제어/측정 구현 및 양자 얽힘 구현</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 초공진기에 PDH 방법으로 주파수 안정화된 &lt; 10 Hz 선폭 고품질 큐비트 제어용 레이저 시스템</li> <li>• 반복률 120 MHz (중심 파장 355 nm, 펄스폭 &lt; 15 ps), output power - 2W) 모드잠금 레이저</li> <li>• 광주파수 빔살 한 주파수 모드에 위상 잠금 된 연속파 레이저 시스템 개발</li> <li>• 개발된 레이저 이용, 단일 양자 게이트 Fidelity 99% 이상, 양자 얽힘 Fidelity 85% 이상</li> </ul>

4. 지원기간/예산/추진체계

○ 기간: 2025.07.01.~2029.12.31.

○ 정부지원연구개발비: 6,000,000천원( ‘25년도 7.39억원, 6개월분)

구분	‘25년도	‘26년도	‘27년도	‘28년도	‘29년도	합계
예산 (백만원)	739	1,315	1,315	1,315	1,315	6,000

※ 단계 평가에 따른 과제 중단 및 연구비 조정 가능

※ 연차별 사업 기간 및 연구비는 정부예산 사정에 따라 변경될 수 있음

○ 과제형태: (일반)연구개발과제

○ 주관연구개발기관: 대학/출연(연)/기업부설연구소 등

○ 기술료 징수여부: 징수

## 5. 특기사항

- 연구과제 국내기업 참여 필수(공동/위탁연구개발기관)
- 과제 신청 시, 개발 제품에 대한 사업화 로드맵 포함 필수
- 국내 원자/이온/분자 기반 양자 기술 산업 생태계 기반을 조성하기 위하여 고품질 단일 및 두 큐비트 생성, 측정, 및 컨트롤을 위한 연속파 단일모드 레이저, 모드 잠금 레이저 (광주파수 빗살), 및 레이저 주파수 안정화용 기준 공진기 제작 관련 업체 참여를 적극 권장함. 과제 선정에 있어 기업 참여 과제 우대
- 연속파 레이저, 광섬유 광주파수 빗살, 및 초공진기 장비 국산화율이 높은 과제 우대
- 레이저 개발 성능, 큐비트 초기화/측정/제어, 양자 얽힘 구현 목표는 과제 제안자가 자유롭게 제안 가능