

2025년도 기본사업 세부(협약)과제 최종보고서										보안등급	
										일반[√], 보안[]	
부처명			과학기술정보통신부				사업명		한국전자통신연구원 연구운영비지원 (기본사업)		
전문기관명			한국전자통신연구원								
과제유형			☐ 기초 ☒ 응용 ☐ 개발 ☐ 기타								
대과제		과제명		성능 한계를 극복하는 초성능 컴퓨팅 실현							
		과제책임자		조일연		소속 및 부서		인공지능컴퓨팅연구소			
						전화번호		4969			
세부(협약)과제		과제명		국문		광기반 결함허용 양자컴퓨팅 기술개발					
				영문		Photonics-based fault-tolerant quantum computing technology					
		과제책임자		문기원		소속 및 부서		양자센서연구실			
						전화번호		6326			
과제수행기간		총 과제수행 기간		2025. 01. 01 - 2025. 12. 31(1년)							
		단계		1단계		2025. 01. 01 - 2028. 12. 31(1년) (1단계)					
				n단계		2025. 01. 01 - 2025. 12. 31(1년) (1차년도)					
연구개발비 (단위:천원)		정부출연금		민감부담금				합계			
				현금		현물		현금		현물	계
총계		2,445,000		2,445,000				2,445,000		2,445,000	
1단계		1년차		2,445,000				2,445,000		2,445,000	
		2년차									
n단계		3년차									
		4년차									
		5년차									
참여인력(M/Y)		총 참여인력		21 명(6.4 M/Y)				1단계	1년차	21 명(6.4 M/Y)	
								('25~'25)	2년차	명(M/Y)	
								2단계	3년차	명(M/Y)	
									4년차	명(M/Y)	
									5년차	명(M/Y)	
								3단계	6년차	명(M/Y)	
('25)											
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)			기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고			
								역할	기관유형		
위탁연구개발기관			KAIST	라영식	부교수			위탁	대학		
			한밭대학교	박지용	부교수			위탁	대학		
연구개발기관 외 기관											
ETRI 실무담당자		성명		문기원			소속 및 부서		양자센서연구실		
							전화번호		6326		

이 보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 과제 중단, 협약 해약, 제재처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2026 년 2 월 27 일

세부과제책임자 : 문 기 원 (인)

대과제책임자 : 조 일 연 (인)

세부(협약)과제 최종보고서 요약문

대과제명		성능 한계를 극복하는 초성능 컴퓨팅 실현												
세부(협약)과제명		광기반 결합허용 양자컴퓨팅 기술개발			과제 유형	기초 개발	응용 기타	TRL	시작	2				
									종료	4				
1 세세부과제명	광기반 결합허용 양자컴퓨팅 기술개발			과제 유형	기초 개발	응용 기타	TRL	시작	2					
								종료	4					
	2 세세부과제명			과제 유형	기초 개발	응용 기타	TRL	시작						
								종료						
3 세세부과제명					과제 유형	기초 개발	응용 기타	TRL	시작					
									종료					
.....					과제 유형	기초 개발	응용 기타	TRL	시작					
									종료					
국가과학기술 표준분류		NB502 (양자광학)		50%	ED0108 (광소자)		40%	EE0101 (컴퓨터이론)		10%				
총 과제수행 기간		2025. 01. 01 - 2025. 12. 31 (1 년 개월)												
총연구개발비		총 2,445,000 천원 * 정부지원연구개발비: 2,445,000 천원 * 기관부담연구개발비: 천원			연구개발비 (단위:천원)		정부출연금	민감부담금	합계					
					총계		2,445,000		2,445,000					
					1단계	1년차	2,445,000		2,445,000					
						2년차								
					n단계	1년차								
2년차														
과제수행 목표 및 내용	최종 목표	○ 광기반 연속변수 양자컴퓨팅 기반 기술 개발 - 비가우시안 상태 생성 (CAT 상태, 평균 광자 수 1.5 이상)												
		○ 양자광집적회로 기반 양자얽힘상태 생성 연구 - 압착광원 소자 개발 (최종 압착수준 목표: -4 dB) - 2-mode 압착광원 소자 개발 - 4-mode 클러스터 상태 생성 소자 개발 - 비가우시안 상태 생성 소자 (CAT 상태, 평균 광자 수 0.5 이상) - 도파손실 0.5 dB/cm 이하, 모드변환 결합 효율 90% 이상 - SHG 변환효율 3000 %/Wcm ² 이상												
	1단계	목표	(1) 양자광집적회로 기술 개발: - 도파손실 1.5 dB/cm 이하 - 도파로-자유공간 모드변환 효율 50% 이상 (2) 압착광원 생성 기술 개발 - 벌크광학계 기반 압착광원 생성 (-5 dB 수준)											
		내용	(1) 벌크 광학계 기반 압착상태 생성 (-5 dB), 호모다인 측정 및 양자 토모그래피 - 상용 OPA 및 SHG 모듈을 이용한 압착상태 생성 - 저손실 압착광 측정 광학계 구축 및 고효율 호모다인 검출기 자체 제작 - 양자 토모그래피 기술 개발 (2) 양자광집적회로 기술 개발: 도파손실 1.5 dB/cm 이하 - 대면적 균일 PPLN 도파로 제작 기술 및 도파손실/비선형 효율 평가 - Adaptive periodic poling 기술 개발 (3) 광집적회로 칩 - 자유공간 커플링 효율 50% 이상 달성 - Mode-size converter 이용한 칩-자유공간 커플링 구조 제작											
		n단계	목표											
		n단계	내용											

과제 수행과정 및 내용	○ 과제 수행과정 연속변수 기반 양자컴퓨팅의 주요 리소스인 비가우시안 상태 생성 기술을 개발한다. 기본적인 연속변수 양자광학 측정인 압착광원의 호모다인 측정 기술을 확보하기 위해 상용 모듈을 이용하여 측정 셋업을 구축하여 측정 기술을 확보한다. 여기에는 벌크 광학계 구축 기술과 전자제어 기술 및 호모다인 측정을 위한 검출기 제작기술 등이 포함된다. 또한, ETRI의 자체적인 연구개발 목표로서 타 그룹에서 확보하지 못한 박막 lithium niobate 광집적회로 플랫폼을 이용한 압착광원을 제작하기 위한 기반 기술들을 개발한다. 구체적으로는 높은 비선형 변환 효율을 확보하기 위한 대면적 adopted periodic poling 기술, 저손실 도파로 제작을 위한 DLC (Diamond-like carbon) 기반 도파로 식각 기술 개발, 저손실 도파로 제작 기술 및 저손실 칩-광섬유 및 칩-자유공간 커플링 구조 집적화 등이 포함된다. ○ 과제 수행내용 ○ 연구개발 내용 (1) 벌크 광학계 기반 압착상태 생성 (-5 dB), 호모다인 측정 및 양자 토모그래피 - 상용 OPA 및 SHG 모듈을 이용한 압착상태 생성 - 저손실 압착광 측정 광학계 구축 및 고효율 호모다인 검출기 자체 제작 - 양자 토모그래피 기술 개발 (2) 양자광집적회로 기술 개발: 도파손실 1.5 dB/cm 이하 - 대면적 균일 PPLN 도파로 제작 기술 및 도파손실/비선형 효율 평가 - Adaptive periodic poling 기술 개발 - 양자메모리 소자 기술 개발 (3) 광집적회로 칩 - 자유공간 커플링 효율 50% 이상 달성 - Mode-size converter 이용한 칩-자유공간 커플링 구조 제작																																					
	과제 수행결과 및 목표달성도	○ 과제 수행결과 <table><tr><th>구분</th><th colspan="6">1단계</th></tr><tr><td rowspan="3">정량</td><td colspan="2">논문</td><td colspan="2">특허</td><td colspan="2">기술이전</td></tr><tr><td>SCI(건)</td><td>비SCI(건)</td><td colspan="2">해외(건)</td><td colspan="2">국내(건)</td></tr><tr><td></td><td></td><td>출원</td><td>등록</td><td>출원</td><td>등록</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1</td><td></td></tr></table> 정성 (1) 고효율 호모다인 검출기 자체 제작 - 대규모 클러스터 상태 생성/측정 위한 기본 요소로, 필요 수량 확보 (4대 이상) - 잡음 특성 개선을 위한 보드 및 패키지 개선 (2) 양자광학 소자 공정 기술 고도화 및 모듈 제작 - 대면적 PPLN 도파로 제작을 위한 e-beam lithography 및 저손실 식각 기술 개발 (cut-back 기준 ~1.23 dB/cm 손실) - 저손실 도파로 제작을 위한 DLC (Diamond-Like Carbon) hard mask 이용한 식각 공정 조건 개발 - 칩-광섬유 및 칩-자유공간 결합효율 향상을 위한 mode size converter 제작 기술 개발 (결합효율 80% 이상 달성) - 비선형 변환효율 극대화를 위한 adopted periodic poling 기술 개발 - 자체 제작 칩 시스템 적용을 위한 광섬유 집적화 모듈 및 온도제어 보드 (3) 연속변수 양자광학을 위한 기본 분석법인 양자토모그래피 등 기술 확보 - 압착 수준 측정 완료 (~5.1 dB)					구분	1단계						정량	논문		특허		기술이전		SCI(건)	비SCI(건)	해외(건)		국내(건)				출원	등록	출원	등록						1
구분		1단계																																				
정량	논문		특허		기술이전																																	
	SCI(건)	비SCI(건)	해외(건)		국내(건)																																	
			출원	등록	출원	등록																																
					1																																	
※ 과제 수행결과: 과제 수행에 따라 발생한 정량적, 정성적 연구개발성과, 기타 계획하지 않은 성과 등 ○ 과제 수행 목표달성도 가. 공통지표																																						

	구분	기본지표							
		지표명	총사업연도	1단계		2단계			3단계
				'25년도	'26년도	'27년도	'28년도	'29년도	'25년도
	과학적 성과	SCI(E) 논문							
	기술적 성과	국내특허(출원)	1	1					
		국내특허(등록)							
		국제특허(출원)							
		국제특허(등록)							
	경제적 성과	기술이전(건)							
기술료(억원)									
관련 분야에 대한 기여	○ 관련 분야 과학적·기술적·경제적·사회적 기여								
	과학적	•박막 lithium niobate 기반 양자광집적회로 제작 기술 개발 - 얽힘광자쌍광원/압착광원/양자파장변환소자 등 양자광학 소자 개발 기술 개발							
	기술적	•모드 변환 구조 설계 및 특허 출원 - 국내특허 1건 출원 진행 중							
	경제적	•양자컴퓨팅 기반 기술 개발 (양자압착광원 측정 기술)							
	사회적	•향후 물류/제약/머신러닝 등 경제/사회적 파급효과가 기대되는 양자컴퓨팅 관련 기술 개발							
성과관리 및 활용계획	○ 후속 과제에 도움을 줄 수 있는 연구 결과								
	- 압착광원/양자클러스터 생성 및 양자연산 시스템 구축의 기본 리소스인 양자압착광 생성 및 측정 기술 개발								
	- 클러스터 생성 칩 및 비가우시안 상태 칩 개발을 위한 양자광집적회로 공정기술 개발								
	○ 성과관리 현황								
	- (데이터 생산 및 관리) 연구동향 관련 기존 데이터, 양자 측정 시스템 설계, 공정 특성평가에 대한 수치, 텍스트 이미지 등 - (연구데이터 저장 및 보존) 원내 연구데이터 저장 시스템 활용한 데이터 관리 (TM/TDP) - (데이터 공동활용) 생산된 데이터는 TM/TDP로 과제원간 공유 등								
	○ 성과 관리 및 활용 계획								
	- (기술적) 양자머신러닝/양자컴퓨터 등 확장된 양자컴퓨팅 시스템 개발에 본 과제 연구개발 결과 적용할 예정이며, 양자광집적회로 기술은 양자통신/양자센싱 등 관련 시스템 기술의 기반기술로 학자 ○ 가능								
	- (확보된 기술의 사업화 전략) 양자광집적회로 기술은 응용 분야에 따라 별도 사업화 등 가능하며, 본 과제 조기 종료 후 시작되는 후속 과제 진척 상황 등에 따라 소자기술별로 기술이전 등 추진 가능								
국문핵심어 (5개 이내)	연속변수	클러스터 상태	비가우시안 상태		양자 광집적회로		양자컴퓨팅		
영문핵심어 (5개 이내)	Continuous Variable	Cluster state	Non-Gaussian State		Quantum Photonic Integrated Circuit		Quantum Computing		

목 차

1. 과제 개요	6
1-1. 과제 수행계획	6
1-2. 현황 및 접근방법	11
2. 과제의 목표 및 수행과정	27
2-1. 과제의 목표	27
2-2. 과제 연차별 수행과정 및 내용	27
2-3. 과제 수행기간 추진체계 및 방법	32
3. 과제 수행결과 및 목표달성도	35
3-1. 과제 수행결과	35
3-2. 목표달성도	41
3-3. 목표 미달 시 원인분석(해당 시)	42
4. 관련 분야에 대한 기여	43
4-1. 과학적·기술적·경제적·사회적 파급효과	43
4-2. 후속 과제에 도움을 줄 수 있는 연구 결과	43
5. 성과관리 및 활용계획	45
5-1. 성과관리 현황	45
5-2. 성과관리 및 활용 계획	45

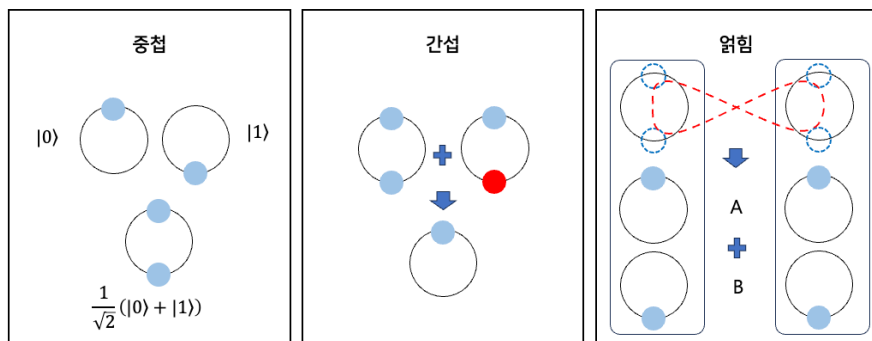
1 과제 개요

1. 과제 수행계획

가. 과제 수행의 필요성

○ 양자컴퓨팅 개념

- 양자컴퓨팅의 정보 단위는 큐비트로, 중첩, 얽힘, 간섭 등이 가능하다는 점에서 고전 정보 단위와 차별
- 중첩(양자병렬성), 얽힘(비고전적 상관관계) 및 간섭을 통해 고전적 알고리즘으로 풀 수 없는 문제를 해결 가능성이 수학적으로 증명
- 물리 큐비트의 성능 향상, 오류보정 코딩 등을 통해 실제 양자컴퓨터 구현 추진 중



<양자중첩, 양자간섭 및 양자얽힘 개념>

물리 큐비트 성능 비교

물리 플랫폼	최대 얽힘 큐비트 개수	최대 결맞음시간	연산속도	얽힘 생성	동작조건	큐비트 확장성
초전도 트랜스몬	51 (2023, USTC)	0.5 ms (2022, Beijing Univ.)	수백 ns	확정적	~20 mK	나쁨 (RF 직접 연결 또는 transduction)
이온트랩	20 (2018, IQI)	~ 1 hr (2021, Tsinghua Univ.)	수~수십 us	확정적	고진공	중간 (복수 광섬유/자유공간)
이산변수 (DV) 광자큐비트	14 (2022, 분당 1회, Max Plank)	~ 1 s (laser coherence time)	ns 이하	확률적	상온	우수 (복수 광섬유)
연속변수 (CV) 광자큐모드	>1M (2016, Univ. Tokyo)	~ 1 s (laser coherence time)	ns 이하	확정적	상온	매우 우수 (단일 광섬유)

○ 물리 큐비트 플랫폼

- 다양한 물리적 큐비트 개발: 초전도 트랜스몬, 포획된 이온, 중성원자, 광자 등
- 물리 플랫폼별로 성능 지표 (결맞음 시간, 양자연산 속도, 얽힘 생성 용이성, 양자연산 속도, 동작 조건 등) 상이
- 결맞음 시간 (coherence time): 양자 상태가 유지되는 시간
- 연산 속도: 양자 상태를 조작하는 기본 연산에 필요한 시간
- 얽힘 큐비트 개수: 서로 얽힘 관계에 있는 큐비트의 개수 (현재까지 실험적으로 구현된 최

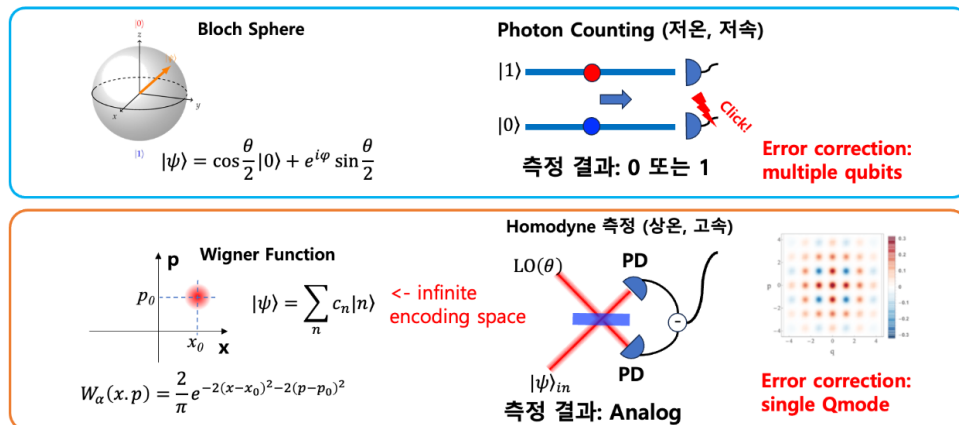
대 개수는 플랫폼별로 위 표에 제시))

○ 이산변수 광자기반 양자컴퓨팅

- 광자를 큐비트로 활용하는 이산변수 광자 기술은 극저온, 고진공 환경을 요구하지 않고 장거리 전송 가능
- **대규모 얽힘 형성 어려움 (확률적 얽힘 생성 및 양자연산: 광자 간 상호작용 낮음)**
 - 이 분야에서 가장 앞서있는 기업인 Quandella 사는 6개 광자 얽힘상태를 수 Hz의 속도로 생성하는 수준으로, 해당 기술로 얽힘 광자 개수를 1개 늘이기 위해서는 10배의 시간이 필요 → **30개 광자의 얽힘상태는 3천조 년에 한번 생성**
- PsiQuantum 사는 광집적회로를 통한 구현 연구 (2016년 665M USD 규모의 투자 유치)
 - Global Foundry와 함께 연구개발, 광집적회로 성능 대폭 개선
 - 현재까지 얽힘광원 성능을 보인 바 없음

○ 연속변수 광자기반 양자컴퓨팅 개념

- 연속변수 (CV, continuous variable) 양자컴퓨팅은 다광자 중첩 상태로 표현되는 양자 상태를 이용한 양자컴퓨팅 개념 제시
- Wigner Function (확률 분포의 일종) 으로 양자 상태 표현 (IQ constellation diagram)
- 정보의 기본 단위는 큐모드(Qmode): 양자컴퓨팅 구현 가능 (**아날로그 컴퓨팅**)
- 큐모드는 CAT state, GKP state와 같은 오류보정에 적합한 형태의 큐비트로 인코딩 가능, 이를 이용하여 결함허용 양자컴퓨팅 구현 가능 (**디지털 컴퓨팅**)



<이산변수 및 연속변수 양자컴퓨팅 양자정보 인코딩 방식 비교>

- 광으로 구현된 CV Qmode는 **확정적 얽힘 생성 및 양자연산 가능**

○ 광기반 CV 양자컴퓨팅 플랫폼은 다음과 같은 장점을 가짐

- **대규모 고차원 얽힘 클러스터 생성**: 타 플랫폼 압도 (100만 얽힘 큐모드 이미 보고)
- **양자 최적화 및 머신러닝 구현 가능** (상온)
- **초고속 양자연산 및 상호연결성**: 5G/6G 광통신 기술로 초고속 연산 및 네트워크 구성
- **오류정정 큐비트 코딩**: CAT 코드, GKP 코드를 통한 오류내성 큐비트 생성
- **대규모 범용 결함허용 양자컴퓨팅 (FTQC, Fault-Tolerant Quantum Computing) 실현**

가능성이 가장 높은 플랫폼



<연속변수 광기반 양자컴퓨팅 기술의 장점>

○ 본 과제의 목표는 다음과 같음

- (1) 연속변수 광기반 양자상태 생성 기술 개발
 - 벌크/광섬유 광학계를 이용한 압착상태 및 비가우시안 상태 생성 기술 개발
- (2) 양자광학 집적회로 (QPIC, Quantum Photonic Integrated Circuit) 양자광원 개발
 - 압착상태 생성 소자 및 모듈 개발
 - 클러스터 상태 생성 소자 및 모듈 개발
 - 양자연산 칩 개발

○ 정부정책 및 기관 목표간 연계성

- (국가 R&D 정책) 국가 12대 전략기술 '양자기술' 및 6대 디지털 혁신 기술 '양자'에 해당
- (R&R) ETRI R&R 상위역할 2: '성능한계를 극복하는 초성능 컴퓨팅 실현/R&R주요역할 2-2: 컴퓨팅의 파괴적 혁신을 위한 인공지능 프로세서 및 양자컴퓨팅 원천기술연구'
- (ETRI 기술지도 2035) ETRI 기술지도 2035 '주요역할 4: 변혁적 컴퓨팅'의 'R04-T07 양자컴퓨팅 기술'에 해당

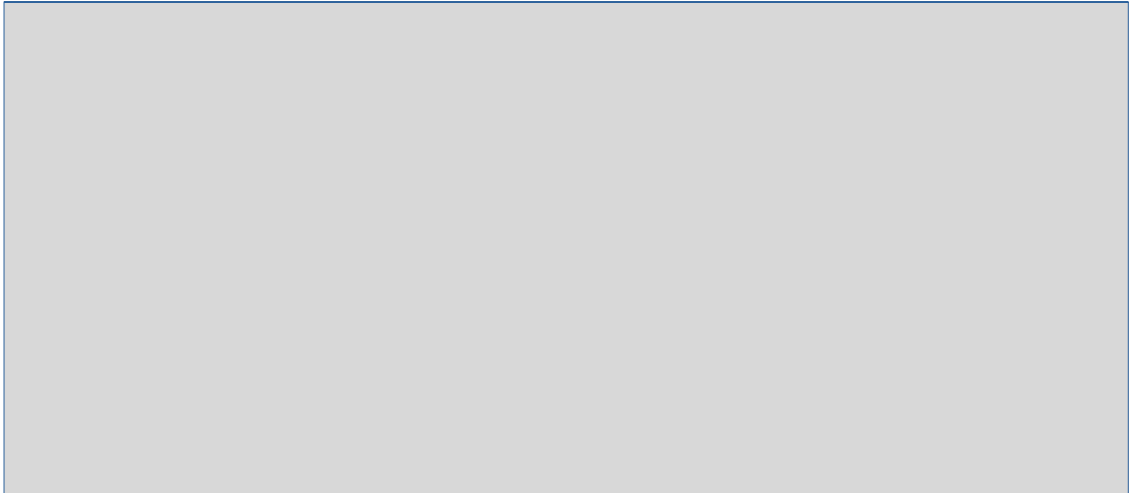
<주요역할 4. 변혁적 컴퓨팅>

핵심기술 번호	핵심기술명	개인			사회		산업				공공							
		디지털 개인비서	반려 로봇	사고율 0% 자율이동	제2의 몸 - 엑소스킨	XR 감정치유	엑스버스	환경인지 생산농장	자율공장	AI 가정교사	의료 AI 중추	초공간 서비스	일라잡이	AI 물참모	디지털 생물이 도시	에너지 거장	디지털 광화문 영장	재난 해결사
R04-T01	뉴로모픽 회로 기술	●	●		●	●			●			●						
R04-T02	학습 데이터 생성 기술	●		●	●	●	●			●		●	●					●
R04-T03	네트워크 컴퓨팅 기술	●	●	●	●		●				●	●	●					●
R04-T04	인간 뇌기능 구현 기술	●	●			●	●		●	●								
R04-T05	인간 뇌 다양성 기술		●			●	●				●							
R04-T06	범용 인간지원 로봇 플랫폼 기술	●	●		●	●	●		●	●		●						●
R04-T07	양자컴퓨팅 기술																	
R04-T08	가변소재 및 형상 기억 기술										●							

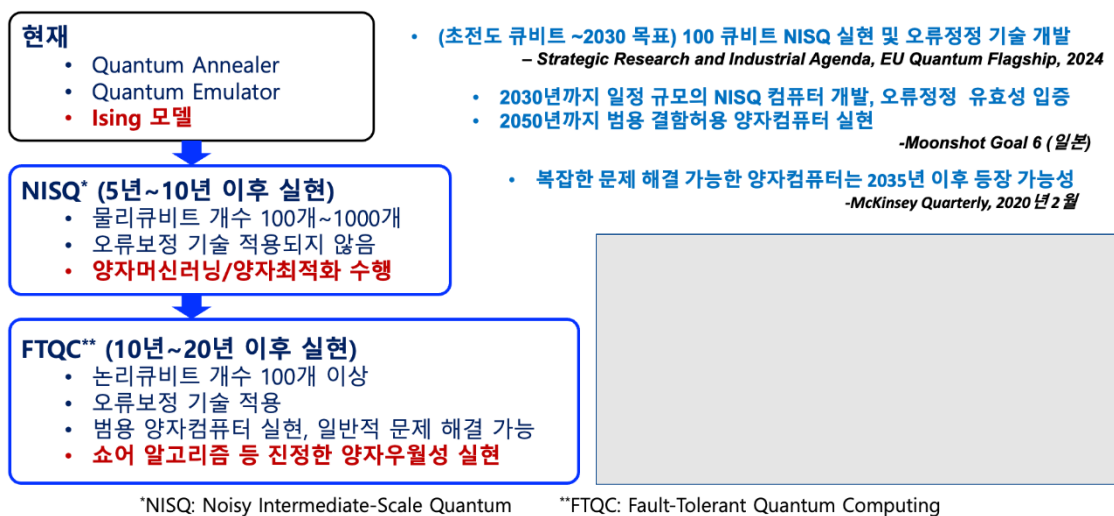
<ETRI 기술지도 2035 발췌>

나. 과제 수행의 중요성

- 양자컴퓨팅을 비롯한 양자기술 개발은 해외 기술 의존도가 매우 높으며, 안보 기술로 인식, 해당 기술 선진국의 기술보호 움직임
- 양자컴퓨팅은 보안, 물류, 보건, 금융 등 다양한 분야에서 막대한 파급효과를 가질 것으로 예상되는 중요 미래기술
- 양자 기술 스타트업에 투자된 펀딩 규모는 매년 증가 추세로, 2021년 기준 21억 달러, 원화로 2.5조원 이상의 투자가 이루어짐
- 구글, IBM과 같은 글로벌 기업들의 자체 투자 규모 포함시 더 큰 규모 투자 예상
- 양자 컴퓨터는 소재, 하드웨어, 시스템 소프트웨어부터 응용 소프트웨어 개발, 클라우드 서비스까지 필요로 함
- 양자 컴퓨팅 생태계에서 초기 경쟁력을 확보하는 것이 중요
- 양자 컴퓨팅 스타트업의 증가율은 줄어들었지만, 이는 전문가 부족, 양자컴퓨팅 산업의 집중화 등의 이유로 해석되며, 이는 오히려 양자 컴퓨팅 산업 초기 진입이 시급함을 의미
- EU Photonics Industry workshop, EU Quantum Flagship, Moonshot project (일본), McKinsey 등 다양한 기관들의 전망에 따르면, 10년 이내 오류보정 기술이 적용되지 않으며 물리 큐비트 100~1000개 수준의 NISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum) 기술이 실현될 것이며, 오류 보정기술이 적용되고 100개 이상의 논리 큐비트가 사용되는 FTQC (Fault-Tolerant Quantum Computing)은 10~20년 후 실현될 것으로 전망
- 현 시점에서 빠른 기술개발로 선진국과의 기술 격차 극복 필요



<양자 컴퓨팅 스타트업 동향 [McKinsey & Company 2022, 6월 보고서]>



<글로벌 양자컴퓨팅 개발 로드맵 요약>

다. 과제 수행의 제약요인

- 본 연구주제 (연속변수 양자광학 기반 양자컴퓨팅 기술 개발)는 해외 연구진의 경우 짧게는 10년 (캐나다/Xanadu), 길게는 30년 (일본/동경대학교)의 연구 경험을 축적한 해외의 연구 그룹에 비해 한국전자통신연구원의 경우 2023년 연구를 시작한 과제이며, 국내에는 관련 연구자가 전무한 상황으로, 초기 연구 인프라 구축이 시급한 상황임
- 다수의 고가 광학 설비가 필요하여, 초기 시설 투자 필수적
- 국내 관련 전공자를 찾기 힘든 상황으로 전문 인력 수급 어려움
- Lithium niobate 광집적회로 공정은 기존 CMOS 공정 및 III-V 화합물 반도체 공정과 호환되지 않으므로, 신규 공정 개발을 수행해야 하며, 교차오염 가능성 등으로 외부 공정 서비스 이용에 제약 상존

라. 과제 수행결과 기대효과

- 후속 과제인 연속변수 광기반 양자컴퓨팅 기술 개발 과제에서 압착광 생성 및 측정 기술과 대규모 얽힘 클러스터 생성 기술 및 비가우시안 상태 생성 기술에 본 과제에서 개발된

압착광 생성 및 측정 기술이 활용될 수 있음

- 후속 과제인 연속변수 광기반 양자컴퓨팅 기술 개발 과제에서 본 과제 수행을 통해 개발한 박막 LiNbO3 기반 양자광집적회로 제작 기술을 통해 ETRI 자체적인 압착광원/클러스터 광원 및 비가우시안 상태 생성 소자/모듈 기술을 고도화할 수 있음
- ETRI 기관 장기목표로써 광기반 양자컴퓨팅을 실현하기 위한 플랫폼 구축 및 클라우드 서비스 제공 등의 기반 기술로써의 의미를 가짐

2. 현황 및 접근방법

가. 국내.외 현황

1) 국내.외 기술동향 및 수준

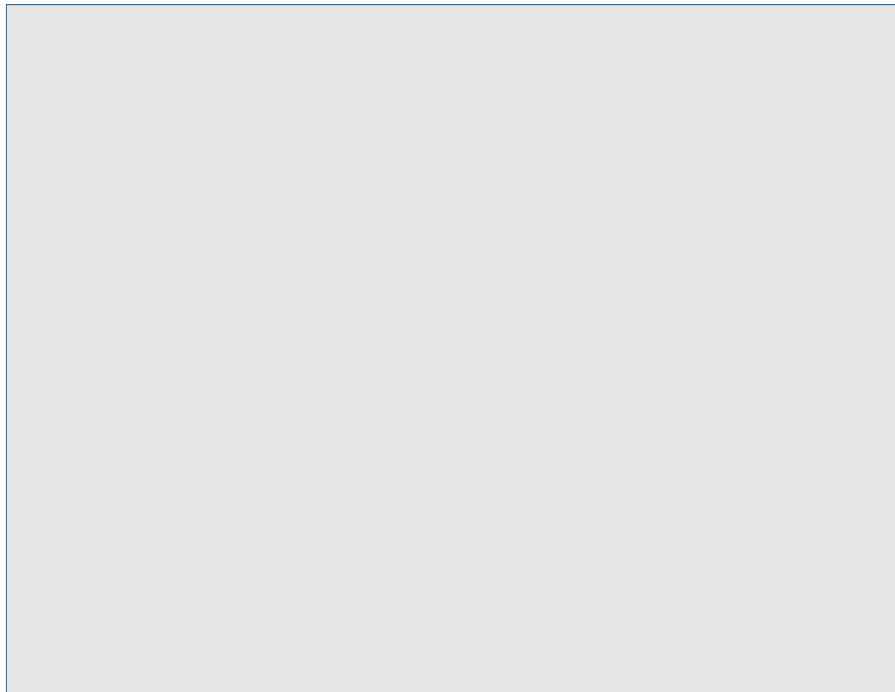
국내 기술 동향 및 수준

구분	내용	
출연연	ETRI	- 양자 광학 컴퓨팅 소자 및 집적회로 개발 - 양자 알고리즘 개발 - 양자 머신러닝 이론 연구/개발 - 양자머신러닝을 이용한 양자오류보정 등
	KIAS	- 양자 컴퓨팅 기반이론 연구 (김재완 교수/권혁준 교수 등) - 보존 샘플링 이론 연구 (임영룡 박사)
	KIST	- 양자 광학계 기반 시뮬레이션 - NV center 양자컴퓨팅 - 양자 정보 이론
	KISTI	- 양자 에뮬레이터 개발
	KRISS	- 초전도 양자컴퓨팅 시스템 개발 - 양자광학, 양자통신 연구
대학	한양대	- 양자얽힘, 비고전성, 벨부등식 일반화, 양자머신러닝 등 (이진형 교수)
	성균관대	- 보존 샘플링, 양자 알고리즘 연구/개발 (허준석 교수) - 초전도 양자컴퓨팅 소자 연구/개발 (정연욱 교수) - 이온포획 양자컴퓨팅 소자 연구/개발 (김준기 교수)
	경희대	- 양자 알고리즘 연구/개발 (이수준 교수)
	서울대	- 양자채널 용량 연구 (정갑균 박사) - 연속변수 양자 광학 이론 등 (정현석 교수) - 이온포획 양자컴퓨팅 소자 연구/개발 (김태현 교수) - 양자점 양자컴퓨팅 소자 연구/개발 (김도현 교수)
	고려대	- 양자 에러 보정 (최만수 교수) - 양자 정보 실험 (최은미 교수)
	연세대	- 양자 데이터/머신러닝 (박경덕 교수)
	KAIST	- 연속변수 양자 광학 (라영식 교수) - 양자 광학 컴퓨팅 소자 (손영익 교수) - 양자 시뮬레이션 연구 등 (이준구 교수) - 양자 정보 이론 (배준우 교수) - 초전도 양자 정보 처리 (김은성 교수)
	부산대	- 양자센싱, 양자메모리 (문한섭 교수)
	포항공대	- 양자광학, 양자통신 연구 (김윤호 교수) - 양자광학 집적회로 연구/개발 (신희득 교수)

국외 기술 동향 및 수준

○ 압착상태 생성 기술

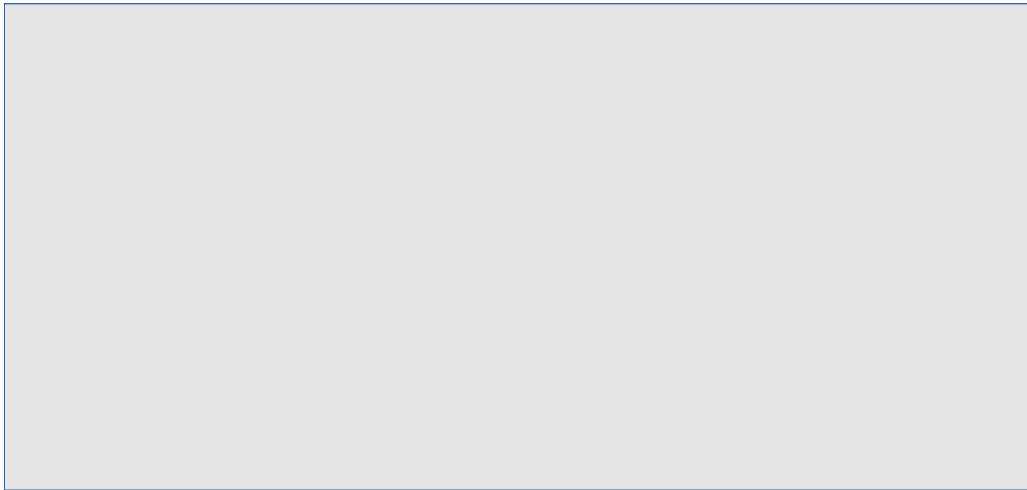
- 압착상태(squeezed state)는 특정 위상(quadrature)의 잡음이 shot-noise level 이하가 되는 양자 상태를 의미하며, 잡음 수준이 고전적으로 허용되는 최소 수준 (shot-noise level)에 비해 얼마나 낮은지를 dB 단위로 표시한 값을 압착수준 (squeezing level)이라고 함
- Fault-tolerant 양자컴퓨터를 위해 요구되는 압착수준은 오류보정기법에 의해 상이한데, -15 dB~ -17 dB 수준 (PRA 100, 010301 (2019))에서 -10 dB (PRX 8, 021054 (2018))까지 다양한 값들이 제시되고 있으며, 실제 실험적으로 이를 넘어서는 압착수준 달성됨
- 현재까지 세계 최고 기록은 2016년 Max Planck institute에서 달성한 -15 dB 이며, 이는 1064 nm 파장에서 bulk-optics 기반의 OPA (Optical Parametric Amplifier)를 통해 달성 (PRL 117, 110801 (2016))



<PPLN OPA 모듈을 이용한 조임상태의 실험적 구현 사례
(NTT, APL 23, 234003 (2023))>

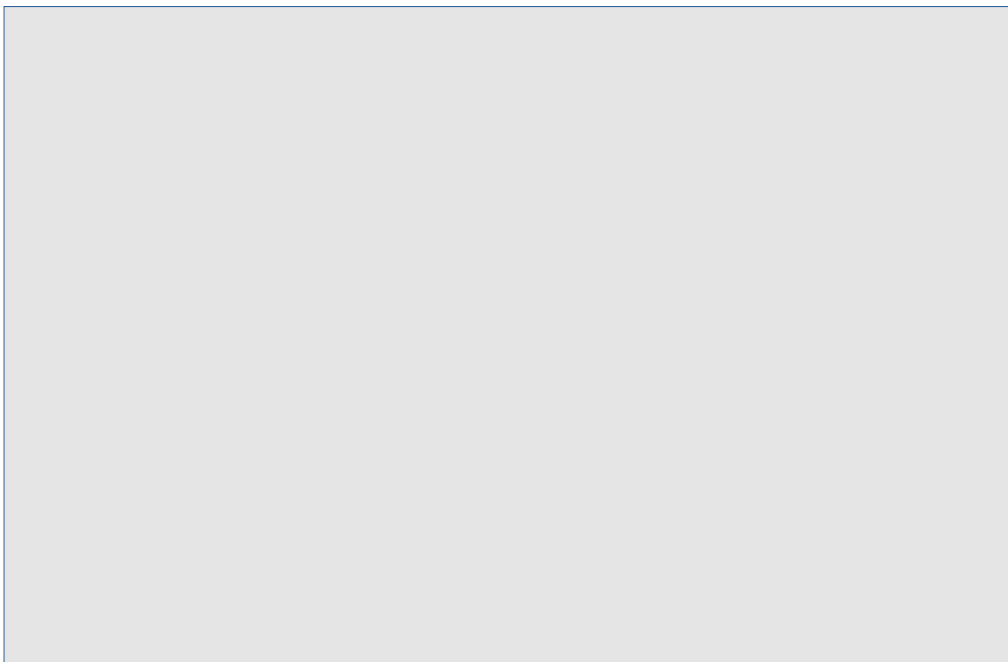
- 현재 광통신 기술의 기반인 C-band에서는 NTT에서 PPLN 기반의 OPA 모듈을 통해 -8.3 dB를 달성하였으며 (APL 122, 234003 (2023)), PPKTP OPA를 이용하여 -12.6dB의 압착수준이 시연 (arXiv:2211.06632v1, (2022)).
- 현재까지 세계 최고 기록은 2016년 Max Planck institute에서 달성한 -15 dB 이며, 이는 1064 nm 파장에서 bulk-optics 기반의 OPA (Optical Parametric Amplifier)를 통해 달성 (PRL 117, 110801 (2016))
- 현재 광통신 기술의 기반인 C-band에서는 NTT에서 PPLN 기반의 OPA 모듈을 통해 -8.3 dB를 달성하였으며 (APL 122, 234003 (2023)), PPKTP OPA를 이용하여 -12.6dB의 압착수준이 시연 (arXiv:2211.06632v1, (2022)).
- NTT에서 시연한 PPLN 도파로 기반의 OPA 모듈 뿐 아니라, 보다 높은 비선형성 및 집적

도를 위해 박막 PPLN PIC (photonic integrated circuit) 기술을 적용하여 압착광원을 구현할 수 있으며, 2023년 스탠포드 및 NTT의 공동연구로 -1.5dB 수준의 on-chip squeezing이 발표 (Nat. Comm. 14:3355 (2023))



<On-chip squeezing @ C-band (Nat.Comm. 14:3355 (2023))>

- 박막 PPLN 플랫폼에서 2090 nm 대역의 4.2dB squeezing이 구현되었다

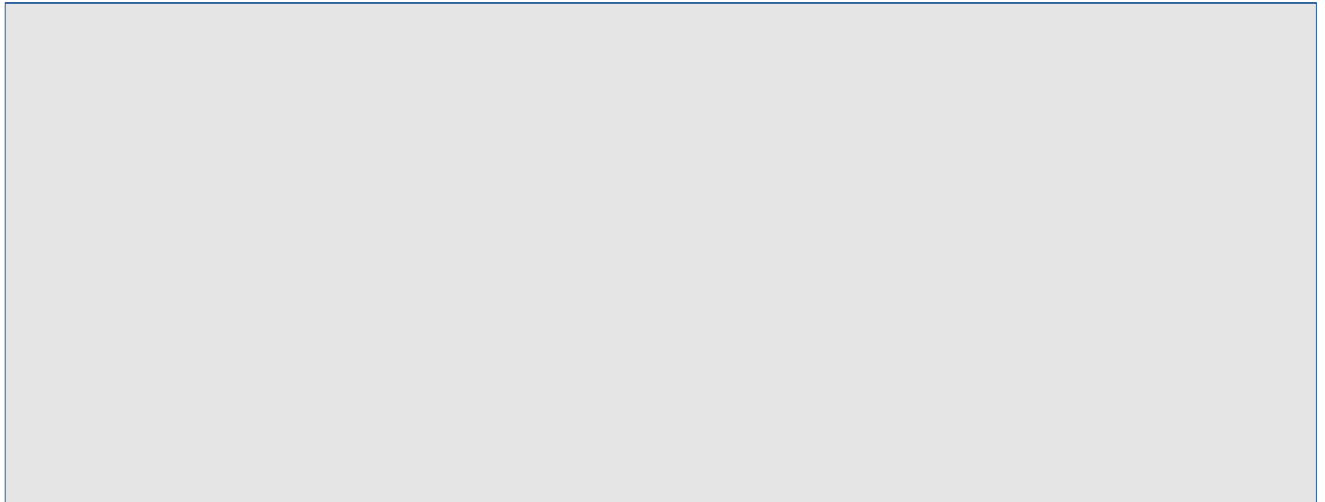


<PPLN Squeezing chip @ 2090 nm (Science 377,1333-1337 (2022))>

○ EPR state 및 1D/2D cluster state 구현 기술

- EPR state는 얽혀있는 두 양자 모드를 의미하며, 두 개의 압착 광원을 BS (Beam Splitter)를 이용하여 간섭시킴으로써 획득
- EPR state를 구성하는 두 모드 중 하나의 모드를 EPR 모드의 생성주기만큼 시간 지연시켜 다시 간섭시킴으로써 1D cluster state를 얻을 수 있으며, 이를 통해 100만개 이상의 얽힘 클러스터 모드를 실험적으로 생성 (APL Photon. 1, 060801 (2016))

- 추가적인 압착광원과 간섭계를 도입하여, 2D/3D로의 확장이 시연 (Science, 366, 373-376 (2019))



<1D cluster state 생성 개념 및 제어 시스템 구조도 (APL photonics 1, 060801 (2016))>

<Time-domain 1D and 2D cluster state 생성 기술 개념 (Asavanant et al., Science, 366, 373-376 (2019))>

- 위에서 시연된 클러스터 상태의 크기(10^6)는 데이터 저장 용량의 문제로 인해 저평가된 결과이며, 실제로는 클러스터 상태 생성에 사용되는 레이저의 선폭(결맞음 시간)에 의해 그 크기가 제한
- 만일 현존하는 최소 선폭의 c-band 레이저 (0.26 Hz, Sci. Rep. 6, 24969 (2016))을 사용할 경우, 10^{10} 개의 큐비트로 구성된 클러스터 상태의 생성이 가능

○ 비가우시안 상태 생성 기술

- 대표적인 비가우시안 상태로는 coherent light의 중첩 상태로 표현되는 CAT state가 있으며, 이를 생성하기 위한 다양한 프로토콜이 개발되어 왔음
- 물질-광자간 얽힘상태를 이용, 광공진기 내의 원자를 활용한 4 photon 수준 (최대 visibility ~ 0.46 수준)의 CAT state 생성 (Max Plank, Nat. Photon. 13, 110-115 (2019))
- Photon subtraction 기법 및 고속 광통신 기술을 이용, 기존 수 kHz 수준에 머물러 있던 CAT state 생성률을 0.9 MHz 수준까지 높인 결과 보고됨 (U Tokyo, NTT, arXiv:2401.17408v1)

<광통신기술기반 고속 CAT state 생성 기술 (NTT, 2024)>

<공진기 내 원자와의 상호작용을 이용한 CAT 상태 생성 기술 (Max Plank, 2022)> <CAT state와 BS를 이용한 GKP 상태 생성 (U Tokyo, 2024)>

- 최근 유망한 오류보정 큐비트로 GKP (Gottesman-Kitaev-Preskill) 상태의 구현이 활발히 수행되고 있으며, 2024년 U Tokyo에서 광기반 최초로 낮은 수준의 GKP 상태 구현됨

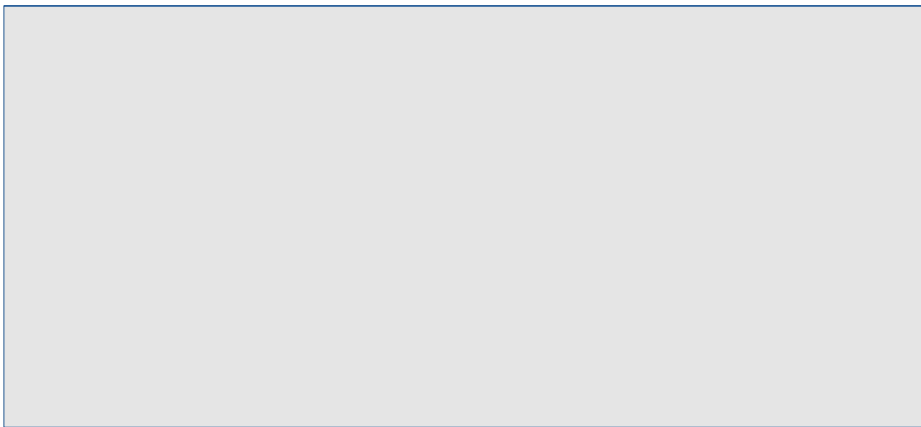
○ 연속변수 양자컴퓨팅 관련 연구현황

- 연속변수 양자컴퓨팅 기술로 주목받고 있는 NISQ 양자알고리즘으로 Gaussian Boson Sampling (GBS), Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA), Quantum Machine Learning (QML)의 세 가지가 있음
- GBS는 2017년 C. S. Hamilton에 의해 고안된 샘플링 기반의 양자 컴퓨팅 기술로, 비선형 광학 광자-쌍 양자 광원의 광출력 통계에서의 본질적인 무작위성 (intrinsic randomness)를 이용하는 방법 [Phys. Rev. Lett., 119, 170501 (2017)]
- GBS는 꼭짓점(vertex)들과 이들을 연결하는 간선(edge)으로 구성되는 인접 그래프 (Adjacent Graph)를 압착 광원(squeezed quantum light)에 인코딩
- 높은 연결성을 가진 부분 그래프(cliques) 찾기, 그래프 완전 매칭, 외판원 문제와 같은 경로 문제, 네트워크 흐름 문제, 그래프 색칠 문제, 분자의 구조, 광합성 유기체의 분자 그래프, 온라인 소매업체의 공급망, 소셜 미디어에서 사람들 간의 네트워크 모델링에 활용가능

- 연속변수 양자컴퓨팅 스타트업인 Xanadu에서 관련 이론 및 실험 연구를 활발히 수행해 왔으며, 임의 그래프의 완전 매칭 문제 [PRA 98, 032310 (2018)], 분자 계산 [J. Chem. Phys. 150, 164113 (2019)], 그래프 구조 데이터에 대한 특성 추출과 관련된 양자커널 응용사례 최초 개발 [PRA 101, 032314 (2020)], 분자 진동 스펙트럼 및 그래프 유사 문제 등 풀이[Nature, 591, 54-60 (2021)]를 시연함

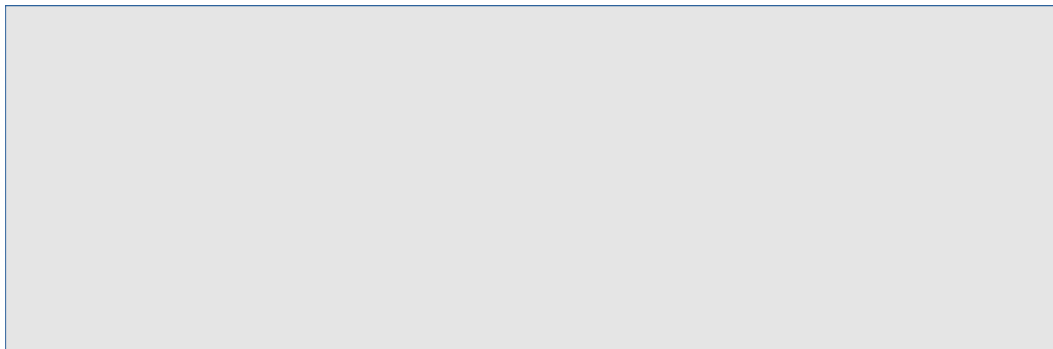


<GBS 기반의 그래프 불변량의 완전집합 알고리즘 개념도>



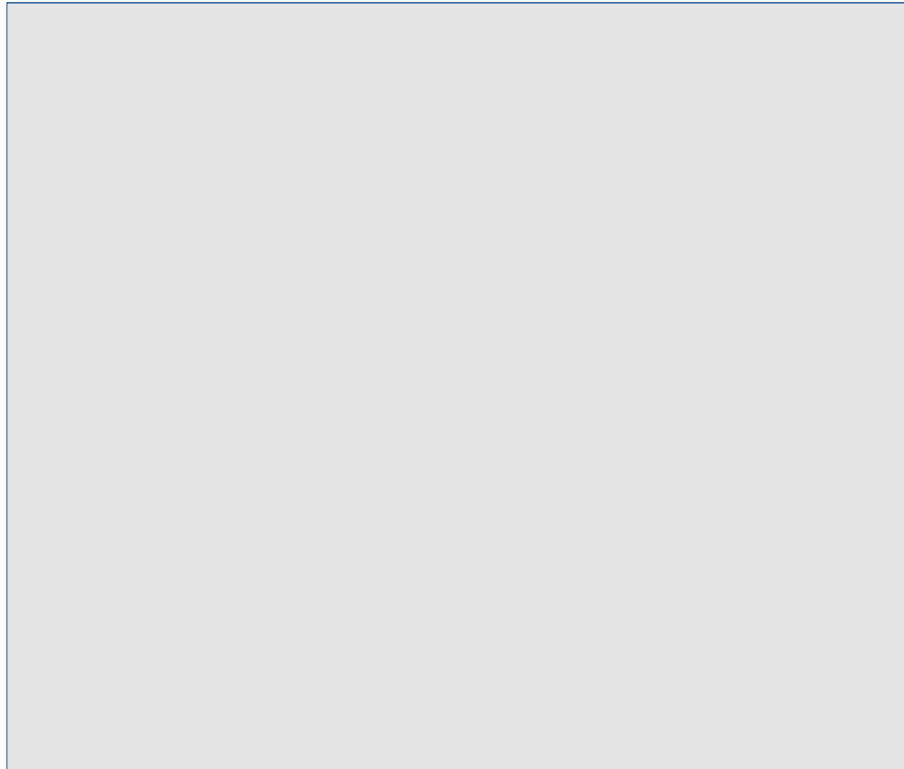
<GBS 전체 제어 시스템 개념도>

- 2023년 NTU의 H. Zhu 등은 Xanadu 시스템을 기반으로 GBS 시스템을 개발, 작업 할당 문제 등의 NP-완전 문제를 풀이하는 것을 시연하였음 [Laser Photonics Rev. 18, 2300304 (2024)]



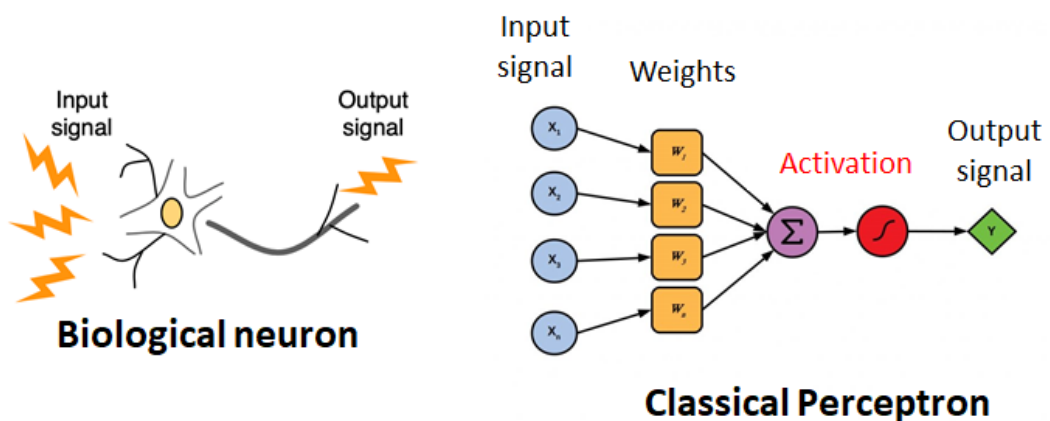
<GBS 기술을 이용한 Task assignment, SAT, Dense graph등 NP-완전 문제 풀이의 예>

- QAOA는 양자-고전 하이브리드 알고리즘으로, 기계학습, 금융 및 물류 등에 응용될 수 있는 NP-hard 문제인 조합최적화 문제에 대한 근사적 해답을 얻을 수 있음
- 양자 회로와 고전 최적화의 조합으로 iteration에 의해 해답을 얻는 구조를 가짐
- 2023년 U Tokyo의 S. Takeda등에 의해 압착광을 이용한 QAOA 알고리즘 실험적으로 구현 [PRR 5, 043005 (2023)]



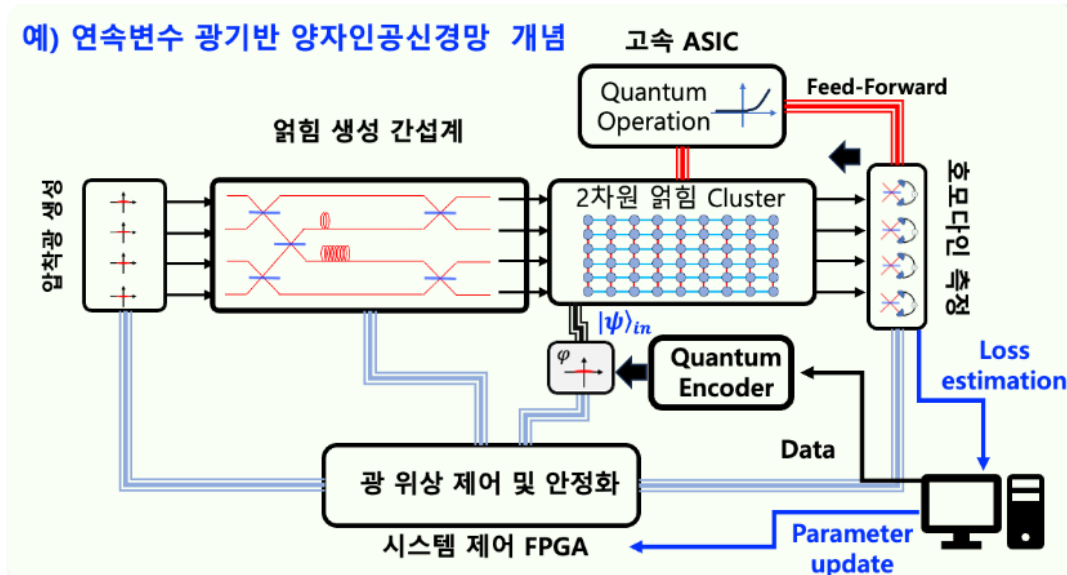
<압착광을 이용한 QAOA 알고리즘 구현 사례>

- 머신러닝의 기본구조는 입력 데이터를 뉴럴 네트워크 형태의 선형 방정식으로 연결되고 각 노드에서 비선형적인, 예를 들어 활성화 함수(activation function)를 통해 일반적인 학습이 가능함
- 양자 머신러닝은 고전적으로 서로 연결되는 뉴럴 네트워크를 양자 채널로 개발하여 양자중첩/얽힘을 활용



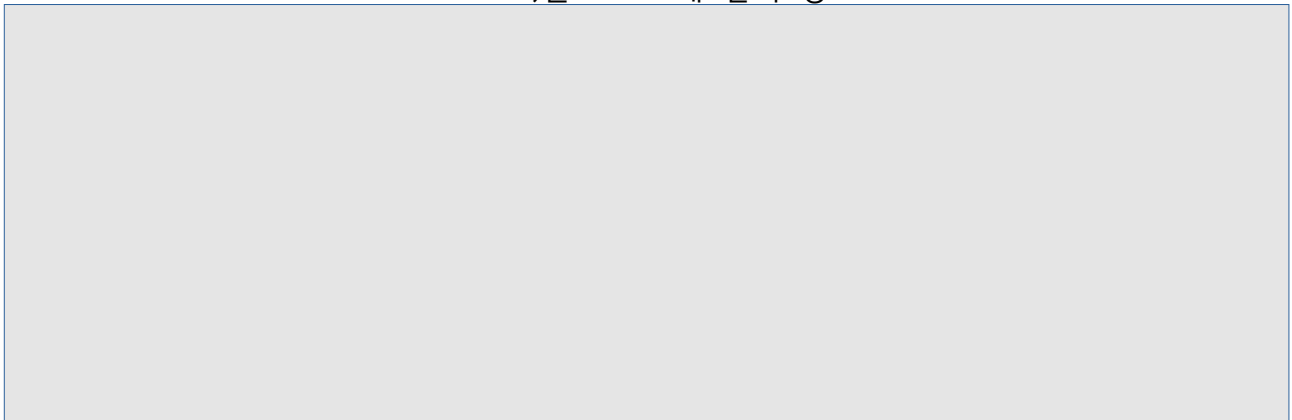
<(좌)기존 신경학적 뉴런과 (우)고전 단층 퍼셉트론 개념도>

- 양자 광학 컴퓨팅 기반의 양자 머신러닝은 아래 그림과 같이 얽힘상태에 양자 정보를 인코딩하여 입력하고, 비선형 활성화함수를 구현함으로써 구현 가능



<양자인공신경망 개념도>

- 양자 광학 컴퓨팅 기반의 양자 머신러닝은 아래 그림과 같이 얽힘상태에 양자 정보를 인코딩하여 입력하고, 비선형 활성화함수를 구현함으로써 구현 가능
- U Tokyo의 A. Furusawa 그룹에서는 연속변수 클러스터 상태에 대한 기본적인 가우시안 연산 [PRA 16, 034005 (2021)], 활성화함수 구현을 위한 nonlinear feed-forward [Nat. Comm. 14:3817 (2023)] 등을 시연하였으며, 103 큐모드급 QCNN (Quantum Convolutional Neural Network)를 Riken에 설치 중



<(좌) 가우시안 양자연산 시연 (우) 비선형 feed-forward 시연>

○ TFLN (Thin-Film Lithium Niobate) PIC 공정 및 소자 연구 동향

- TFLN은 2차비선형계수가 매우 큰 lithium niobate를 박막 형태로 가공한 소재로, 양자광집적회로 및 초고속 광통신 분야의 주요 플랫폼 으로 주목받고 있으며, LNOI (Lithium Niobate On Insulator)로 불리기도 함
- LNOI 도파로는 Ti diffusion, proton exchange, dicing 등으로 제작 가능
- 저손실 (<0.1 dB/cm) 도파로 제작은 CMP (Chemical Mechanical Polishing) 및 dry etching 공정으로만 가능하며, 복잡한 형상의 QPIC 제작에는 Dry etching법이 적합

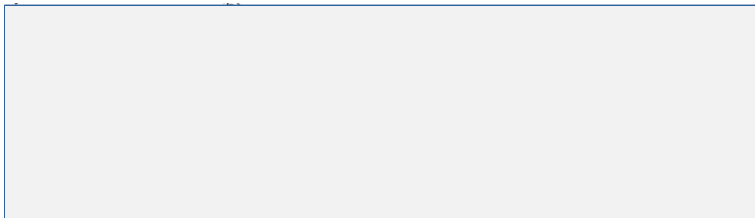
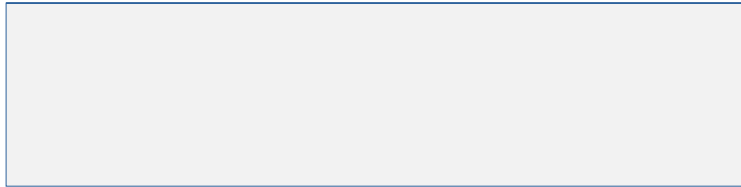
- CMP 기법으로 0.027 dB/cm (Nanomaterials (Basel) 8 (11), 910, 2018) 도파로 손실 및 ICP-RIE 기법으로 역시 0.027 dB/cm (Optica 4 (12), 1536-1537 (2017)) 도파로 손실 달성한 바 있으며, 이는 물질의 intrinsic loss에 가까운 값으로 추정

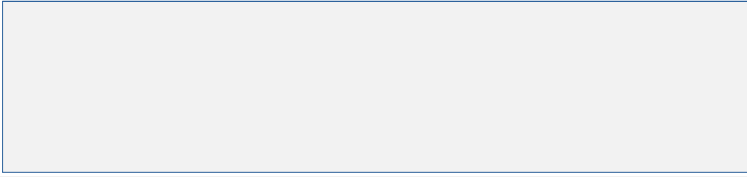
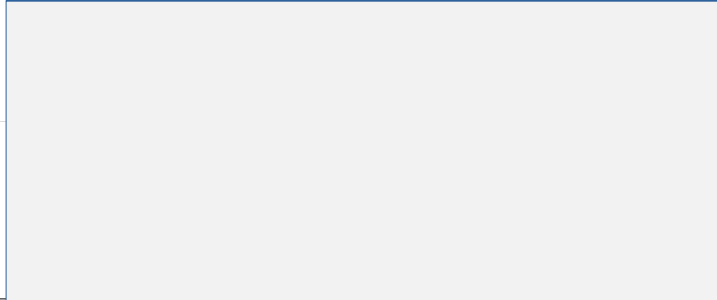
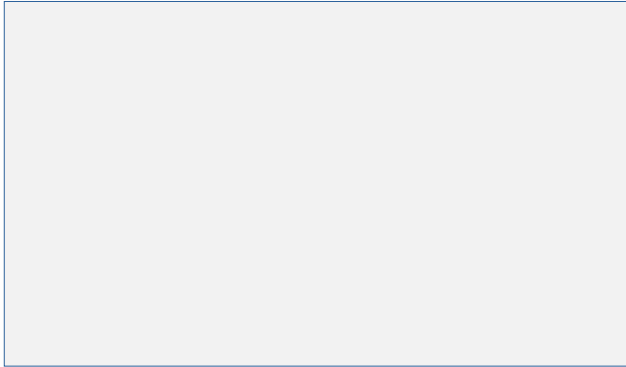
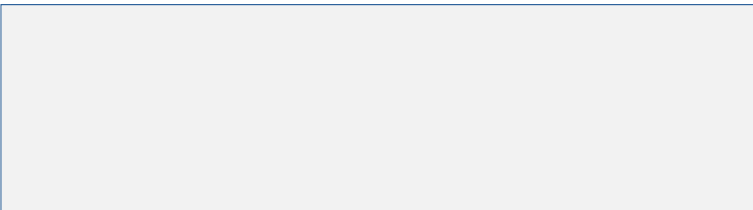


<식각 기법별 LN01 광도파로 손실 (Advances in Optics and Photonics 13 (2), 242-352 (2021))>

- 이러한 LN의 우수한 특성을 활용한 다양한 광집적회로 소자들이 개발되고 있으며, 양자광학기술 응용이 활발히 연구되고 있음

LN01 기반 양자광학 소자 개발 사례 (일부)

소자종류	세부사항 및 성능	출처
엄밀광자쌍 광원	·주기분극 LN01 광도파로 기반 ·PCR/CAR = 11.4 MHz/668, 76 kHz/67224 ·2광자 간섭 visibility > 99% ·Heralded single-photon correlation < 0.025 ·광자쌍 생성 효율: 45 MHz/1mW 	·PRL 124, 163603 (2020)
	·주기분극 LN01 공진기 기반 ·PCR/CAR = 8.5 MHz/451, 36.3 MHz/100 ·Heralded single-photon correlation ~0.008 ·광자쌍 생성 효율: 2.7 MHz/1μW 	·PRL 125, 263602 (2020)

	·주기분극 Ti-diffused LN PIC 기반 ·TR-HOM 간섭계 적용, 광자 분리 ·HOM visibility 92.9 % ·Photon flux $\sim 1.4 \times 10^7$ pairs/nm⁻¹mW⁻¹ 	·PRL 113, 103601 (2014)
광변조 소자	·LN01 기반 초고속 광변조 소자 ·CMOS 호환 ($V_{\pi}=1.4$ V) ·CMOS 회로 직접 변조 70 Gbps ·8-ASK 변조 210 Gbps 	·Nature 562, 101-104 (2018)
단일광자 검출소자 (SNSPD)	·Reconfigurable LN01 광집적회로와 SNSPD 2개 소자 단일 칩 집적화 (NbTiN) ·도파로 손실 0.2 dB/cm, 1GHz 변조속도 ·검출 효율 $\sim 25\%$, Timing jitter 17 ps 	·Nat. Comm. 12:6847 (2021)
	·LN01 도파로상에 NbN SNSPD 집적화 ·검출효율 46%, DCR 13 Hz, Timing jitter 32 ps 	·APL 116, 151102 (2020)

2) 국내.외 표준화 현황(또는 향후 기술 발전 추세)

- 양자컴퓨팅 기술의 국외 표준화 동향은 공적 표준화 기구 (JTC1 WG14 (Quantum Information Technology) 및 IEC TC90 (Superconductivity)와 사실 표준화 기구인 IEEE가 주도하고 있음
 - JTC1 WG14는 양자컴퓨팅 연구개발 과정에서 발생하는 격차를 줄이기 위한 표준화

활동을 수행하고, 양자컴퓨팅 연구에 사용되는 용어 및 개념 관련 표준 및 양자머신 데이터셋, 양자자원 분석 플랫폼 관련 표준 개발 진행

- IEC TC90 (Superconductivity)는 초전도 소자 기반 양자 기술 표준화 진행중이며, SNSPD, 암전류 및 조셉슨 접합 시험평가 표준 제정 완료 ('21~'22)
- IEEE는 양자컴퓨팅 관련 용어 및 성능 알고리즘 등의 표준 프로젝트 진행 중이며, 양자컴퓨팅 용어 (P1730), 성능 지표 및 벤치마크 (P1731), 아키텍처 (P3120), 알고리즘 개발 (P2995), 시뮬레이터 (P3120.1)등에 관한 표준 개발 중

3) 동일, 유사내용에 대하여 국내.외 관련자들의 수행내용

□ 국내 경쟁기관 현황

- 양자컴퓨터 연구는 해외 연구기관과의 공동연구를 통해 기초원리 중심으로 기술개발 수행 중
 - KIST에서도 2큐비트 양자컴퓨터 기술을 확보하고 '15년부터 정부 지원을 통해 본격적인 양자컴퓨터 개발을 추진 중에 있음
 - 한국전자통신연구원(ETRI)은 2020년 광집적회로 4큐비트 양자 프로세서 기술을 확보하였고, 영국 옥스퍼드대와 차세대 ICT 플랫폼·양자컴퓨터 개발 협력협정 체결을 하고 본격 협력을 진행 중
 - 한국과학기술정보연구원(KISTI)은 호주 뉴사우스웨일즈대학, 미국 퍼듀대학과 공동으로 실리콘 물질을 이용해 다중 큐비트 시스템을 구현할 수 있음을 처음 입증하였으며, 3차원 반도체 물질의 전자구조 계산 S/W를 개발하여 퍼듀대학과의 협동 계산 연구를 수행함
- 박막 PPLN 광집적회로 기반 비선형 양자소자 제작 기술
 - ETRI에서는 박막 PPLN 기반의 비선형 양자소자 제작 기술을 연구하여, 얽힘광자쌍 생성 소자 기술 및 광집적회로 플랫폼 기술을 확보함 (얽힘광자쌍 생성률 15 MHz, 도파로 손실 0.17 dB/cm 달성)
- 확정적 단일광자 어레이 광원 기술
 - KAIST에서 양자점과 나노 cavity 포토닉 크리스탈 구조를 이용하여 단일광자 생성 기술을 발표하였고 광도파로 구조에서 광원의 방향성은 우수하지만 공명 파장 정합의 어려움 때문에 약 0.25 수준의 $g(2)(0)$ 값을 보고함(2015, Sci. Rep.)
 - 부산대는 표준연과 공동으로 PPLN을 이용하여 spontaneous parametric down conversion 방식의 bulk optics 기반 광자쌍 생성 기술을 개발하였고 0.1 미만의 $g(2)(0)$ 특성을 가지고 있음
 - ETRI는 인하대와 공동으로 Si 광도파로 기반 ring 공진기에서 four wave mixing을 이용한 광자쌍 생성 기술을 연구하였고, 관련 기반 기술을 보유하고 있음
- 고효율 단일광자 어레이 검출기 기술
 - ETRI는 (주)우리로와 공동연구를 통해 2 ns의 게이트펄스에서 10 ppm의 암전류 발생확률과 15 %의 detection efficiency를 실현
 - KIST는 수원나노랩 그리고 아주대와의 공동연구를 통해 2016년 100 kHz 게이트펄스 하에서 15 %의 detection efficiency를 실현 (동작 온도 230K)
- 광집적회로 기반 양자 게이트 회로기술

- 표준연구원 그룹이 벌크 광학시스템에서 4광자 7큐비트 얽힘상태 구현 및 2 큐비트 Deutsch-Jozsa 알고리즘 fidelity 평가 (Opt. Express, 2012)
- 광집적회로 기반의 대표적 연구성과는 ETRI를 중심으로 실리콘, LiNbO3 플랫폼을 중심으로 양자프로세서 기본 성능을 구현함

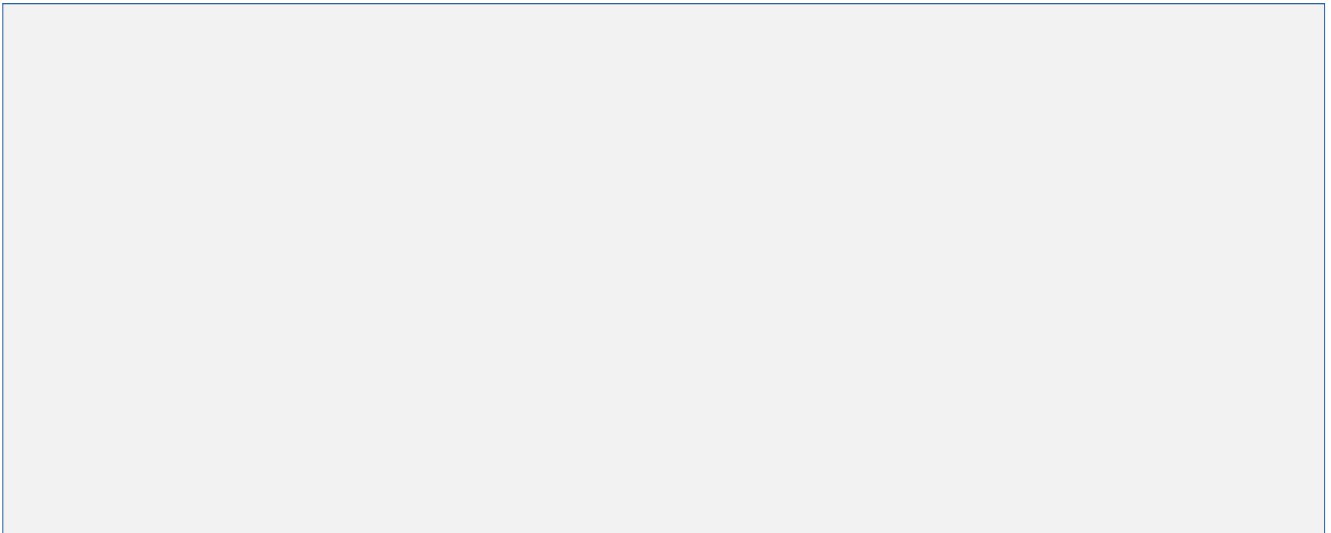
4) 동일, 유사내용과 관련하여 제안자가 이미 수행한 사업 또는 연구개발과제

- 박막 PPLN 광집적회로 기술 관련, 2021~2025년 “단일광자 파장변환용 PPLN 광도파로 소자 개발” 과제 (IITP) 수행 이력 (역할: 참여연구원)

5) 국내.외 경쟁기관 현황

○ 이산변수 광기반 양자컴퓨팅 기술

- 2017년 설립된 프랑스의 Quandella사는 양자점 기반의 얽힘광원에서 경쟁력을 가지고 있으며, 6개의 얽힘광자를 수 Hz의 생성률로 제공하여, 이를 이용하여 GBS, VQE (Variational Quantum Eigensolver), QCNN 등을 시연한 바 있음 (현재 이산변수 광기반 양자컴퓨팅에서 가장 앞선 결과를 제시함)

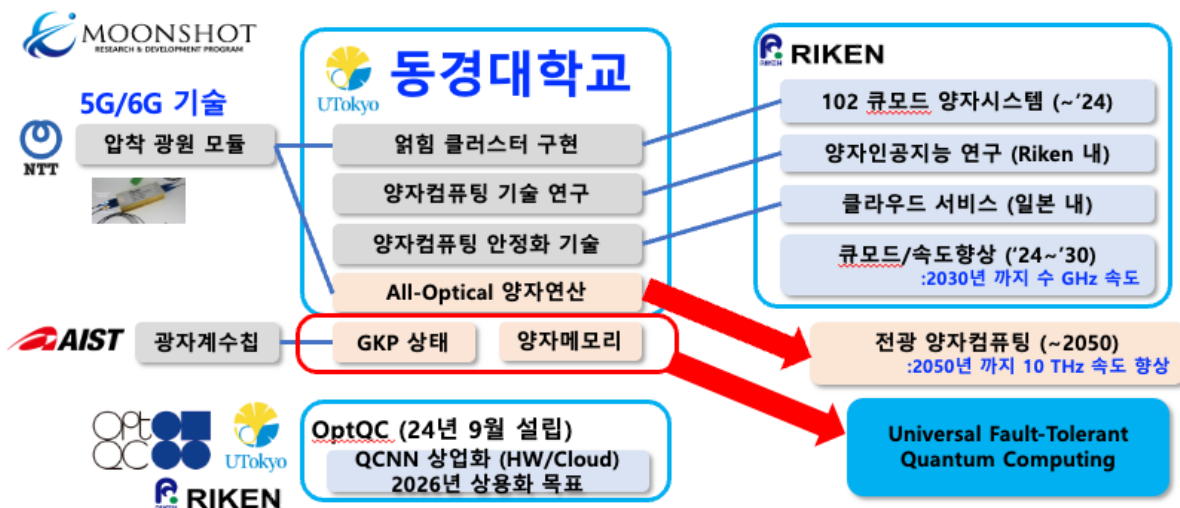


<Quandella사의 양자컴퓨팅 주요 결과>

- 2015년 설립된 미국의 PsiQuantum 사는 광기반 FTQC를 목표로 GlobalFoundries사와 협력하여 양자광집적회로 공정 기술 개발 중으로, 2016년 \$665M 규모의 투자를 미 정부로부터 유치, 기존 광집적회로 기술 수준을 한단계 끌어올린 결과를 보여주고 있음
- 2024년 호주 정부로부터 \$670M 규모의 추가 투자를 이끌어내어 100만 큐비트 범용 결함허용 양자컴퓨팅 기술 개발 중으로, 자체적인 Fusion-based quantum computing이라는 이론 모델 구현을 위해 노력중이나, 아직 컴퓨팅 결과는 보고하지 못하고 있는 상황

<PsiQuantum 기술개발 요약>

○ 연속변수 광기반 양자컴퓨팅 기술



<일본 연속변수 양자컴퓨팅 기술 개발 현황>

- 동경대학교는 일본의 국가적 난제 해결 프로그램인 MOONSHOT 프로그램의 일환으로 양자컴퓨터를 개발하고 있으며, 이 중 광기반 플랫폼을 연속변수 광기반 양자컴퓨팅으로 목표를 설정
- 해당 프로그램 리더는 동경대의 A. Furusawa 교수로, NTT, AIST, RIKEN 등이 참여
- NISQ 알고리즘 중 QAOA 및 QCNN 구현을 위해 NTT의 초고속 광통신 기술과 U Tokyo의 연속변수 광기반 양자컴퓨팅 기술 및 Riken의 AI 기술이 결합되어 추진
- 범용 FTQC 개발을 목표로 AIST, U Tokyo등을 중심으로 광자계수 시스템, GKP 상태 생성기술 등이 연구되고 있음
- 최근 해당 연구그룹에서 OptQC 라는 양자컴퓨팅 회사 설립, AIST에 시스템 구축할 예정이며, 2026년까지 상용화를 목표로 하고 있음
- 범용 FTQC는 MOONSHOT 프로그램에서는 2055년까지 실현을 목표로 하고 있음



Quantum Flagship (2022~2025):

Scalable continuous variable cluster state quantum technologies 44억원



DTU
Danmarks
Tekniske
Universitet

Ulrik L. Andersen (DTU)
:Quantum Photonics

1. CV 클러스터 생성 (Fiber optics & LNOI 기술)
2. 실용적 양자기술 개발을 위한 얽힘 구조 이론 및 실험
3. CV 클러스터 기반 양자알고리즘 및 양자 프로토콜
4. CV 클러스터 기반 양자컴퓨팅 및 네트워크 오류보정



SDU

csem

QANT

LNOI 기반
기술 보유



Universita Politecnica
di Torino

JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT

TopQC2X (2024~2028):

Innovative Quantum Computing
based on GKP qubits 47억원



DTU
Danmarks
Tekniske
Universitet

Ulrik L. Andersen (DTU)
:Quantum Photonics



SDU
University of
Southern Denmark

Jørgen E. Andersen
:Quantum Mathematics

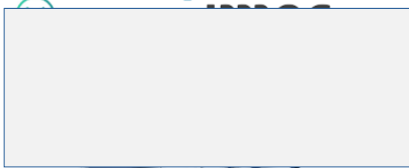
1. SDU에서 topological quantum field 이론 기반의 양자컴퓨팅 모델 제시
2. DTU에서 광학적 방법으로 실험적 검증 완료
3. 기술 개발의 핵심은 GKP 상태 생성
4. U. L. Anderson 교수는 cavity electrodynamics 이용한 확정적 GKP 상태 생성 이론 모델 제시

<DTU 연구개발 현황 정리>

- DTU의 U. Anderson 교수는 연속변수 양자광학 기술의 개발을 목표로 유럽 Quantum Flagship의 CLUSTEC 프로그램 수행 중으로, 연속변수 양자광학기술을 이용한 양자통신, 양자컴퓨팅 연구를 프로그램 내 다수의 연구 그룹과 협력하여 수행 중
- 2024년부터 TopQC2X 프로그램을 통해 GKP 큐비트를 이용한 양자컴퓨팅 기술 개발을 SDU의 양자이론가인 J. E. Anderson교수와 함께 수행
- 2D 클러스터 상태를 보고한 바 있으며, GKP 상태를 생성하기위한 이론적 기법 제시 (아직 실험적 구현은 하지 못하였음)

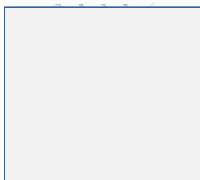
H/W

• Gaussian Boson Sampling



- 3D Cluster Generation
- 초저온 PNRS

• Fault-Tolerant Quantum Computing



확률적 GKP 상태를 일부 포함하는 3차원 구조에서의 FTQC 실현 연구

S/W

HW/SW 인력 비중: 20:80

PennyLane: Quantum Programming Platform

Strawberry Fields: Quantum Programming Platform for Photonic Quantum H/W

Simulator

Lightning: Quantum State Simulator

Jet: Tensor network contraction engine

→ SW/HW 동시 추구

→ FTQC 목표

→ 2016년 이후 \$245M

<Xanadu 사의 양자컴퓨팅 개발 현황>

- 캐나다의 Xanadu사는 연속변수 기반의 FTQC를 목표로 설립된 스타트업으로, 양자컴퓨팅 시뮬레이션 플랫폼을 포함 다수의 소프트웨어 플랫폼을 제공하고 있으며, Sampling 기반의 컴퓨팅으로 양자우월성을 보인 바 있음

- GKP 상태를 구현, 3차원 클러스터에 포함시킴으로써 이를 통한 FTQC 구현을 목표로 연구개발 추진

6) 국내.외 지식재산권 현황

<u>Preliminary</u>		<u>Q. Computing</u>	<u>Q. Comms.</u>	<u>Q. Sensing</u>
China	53.8	54.1	46.2	59.7
Japan	15.2	15.4	18.4	14.8
European Union	11.2	11.5	10.0	14.8
United States	10.0	9.6	6.5	4.5
South Korea	4.0	3.9	6.2	3.4
Taiwan	1.8	1.8	4.5	2.3
United Kingdom	1.2	1.0	3.4	0
Canada	0.8	0.6	1.6	0
Switzerland	0.6	0.6	1.0	0
Russia	0.6%	0.6%	0.5%	0%

<2000~21년 기간 동안 양자기술 관련 특허 비율>

- 중국 정부 정책 및 대규모 투자에 따라 최근 중국의 특허 비율이 증가함.
- 일본은 2000년 초부터 Top 3 내의 특허 비율을 유지하고 있음.
- 미국 및 유럽은 2005년까지 특허 최대 비율을 유지하였지만, 산업계의 특허에 대한 인식 변화로 인해 특허 비율이 최근 줄어듦

나. 핵심요소 및 접근방법

- 과제 핵심 요소 1. 연속변수 광기반 양자상태 생성 및 측정 기술
 - 이차비선형 광학 모듈을 이용한 C-band 압착광 생성 광학 시스템 구축 (고품질 양자간섭계 광학 시스템 구축 및 측정)
 - 저손실 호모다인 측정을 위한 호모다인 검출 모듈 제작
 - 호모다인 측정을 위한 고품질 (모드 및 스펙트럼) Local oscillator 광학계
 - 광 위상 제어를 위한 위상 잠금 기술 및 광변조/복조 기술
 - 광대역 압착광 측정 기술
 - Photon subtraction 광학 시스템 정렬 기술 및 이를 위한 photon counting/heralding 기술
- 과제 핵심 요소 2. 비선형 박막 소재 (TFLN:Thin-Film Lithium Niobate)기반 양자광집적회로 설계 기술
 - Quasi Phase Matching (QPM) 기반 이차비선형광학변환 도파로 설계 기술
 - Passive PIC 요소 설계 기술 (MMI coupler, directional coupler, taper, bend)
 - Chip-to-fiber/chip-to-free space 광 커플링 구조 (Mode size converter) 설계 기술

- 과제 핵심 요소 3. 비선형 박막 소재 (TFLN:Thin-Film Lithium Niobate)기반 양자광집적회로 제작 기술
 - 대면적 주기분극 구조 제작 기술
 - Stitching-error free 대면적 전자선 리소그래피 기술
 - 저손실 박막 LNOI 도파로 식각 기술
 - 저손실 2단 taper 구조를 갖는 mode size converter 공정 기술
 - 온도 제어 가능한 fiber-block 기반 다중 광입출력 모듈 제작 기술 및 온도제어 보드
- 핵심 요소 접근 방법
 - BPM/FDTD 수치해석을 이용한 소자 설계
 - 고효율 비선형 변환을 위한 adopted periodic poling 기술을 적용하여 대면적 PPLN 구조 구현
 - Diamond-like carbon 막을 hard mask로 이용, 도파로 측벽의 roughness 최소화 및 etching angle 증가, deep etching 위한 공정기술 확보
 - 검증된 NTT 상용 모듈을 이용하여 대표적 연속변수 양자광학 측정 셋업인 압착광 생성/측정 시스템 조기 구축하여 측정 기술 확보
 - Integrated cavity의 품질 지수 측정 및 cut-back 방법의 두 방법으로 도파 손실 및 커플링 손실 정량화
 - NTT 상용 모듈의 실측값을 기준으로, 자체 제작한 압착광원 특성 비교 평가
 - Fiber block 및 패키징 기술 개발
 - 위탁 연구를 통한 비가우시안 이론 개발

다. 혁신성과 독창성

- 본 과제는 MBQC (Measurement-Based Quantum Computing)에 필수적인 대규모 양자얽힘 클러스터를 생성할 수 있는 유망 플랫폼인 연속변수 광기반 양자컴퓨팅 플랫폼의 주요 요소인 비가우시안 상태 생성 기술 개발을 목표로 함
- 초전도/이온트랩/중성원자 등 기타 플랫폼에 비해 압도적인 규모의 클러스터 상태 생성 가능한 플랫폼
- 본 과제에서는 국내 두 번째로 연속변수 양자광학 실험 플랫폼을 구축하고, 여기에 ETRI에서 자체적으로 개발한 양자광집적회로 기반 기술을 이용하여 자체적 소자를 제작하여 시스템에 적용하고자 함
- 양자광집적회로를 통해 variable beamsplitter/modulator등을 하나의 소자에 집적화하여 시스템에 적용하는 것은 전세계적으로 최초의 접근법
- 대규모 spatial mode 확장을 위한 phase locking component 집적화, generalized photon addition/subtraction 등 다양한 세계최초 소자 개념 개발 예정

1. 과제목표

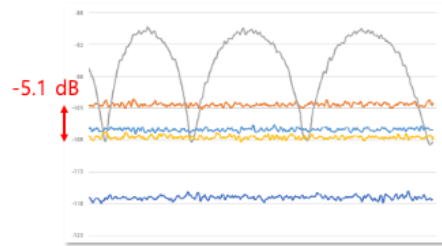
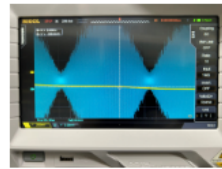
구분		주요 내용
연구개발 목표 및 내용	최종 목표	○ 최종목표 ○ 광기반 연속변수 양자컴퓨팅 기반 기술 개발 - 비가우시안 상태 생성 (CAT 상태, 평균 광자 수 1.5 이상) ○ 양자광집적회로 기반 양자얽힘상태 생성 연구 - 압착광원 소자 개발 (최종 압착수준 목표: -4 dB) - 2-mode 압착광원 소자 개발 - 4-mode 클러스터 상태 생성 소자 개발 - 비가우시안 상태 생성 소자 (CAT 상태, 평균 광자 수 0.5 이상) - 도파손실 0.5 dB/cm 이하, 모드변환 결합 효율 90% 이상 - SHG 변환효율 3000 %/Wcm² 이상
	목표	○ 당해연도 (1) 양자광 - 도파손실 - 도파로 (2) 압착광원 - 벌크광학계 기반 압착광원 생성 (-5 dB 수준)
	1단계 내용	○ 연구개발 내용 (1) 고효율 호모다인 검출기 자체 제작 - 대규모 클러스터 상태 생성/측정 위한 기본 요소로, 필요 수량 확보 (4대 이상) - 잡음 특성 개선을 위한 보드 및 패키지 개선 (2) 양자광학 소자 공정 기술 고도화 및 모듈 제작 - 대면적 PPLN 도파로 제작을 위한 e-beam lithography 및 저손실 식각 기술 개발 (cut-back 기준 ~1.23 dB/cm 손실) - 저손실 도파로 제작을 위한 DLC (Diamond-Like Carbon) hard mask 이용한 식각 공정 조건 개발 - 칩-광섬유 및 칩-자유공간 결합효율 향상을 위한 mode size converter 제작 기술 개발 (결합효율 80% 이상 달성) - 비선형 변환효율 극대화를 위한 adopted periodic poling 기술 개발 - 자체 제작 칩 시스템 적용을 위한 광섬유 집적화 모듈 및 온도제어 보드 (3) 연속변수 양자광학을 위한 기본 분석법인 양자토모그래피 등 기술 확보 - 압착 수준 측정 완료 (~-5.1 dB)
	2단계	

2. 과제 연차별 수행과정 및 내용

(1) (1단계) 1차년도(2025년도) 개발 내용 및 범위

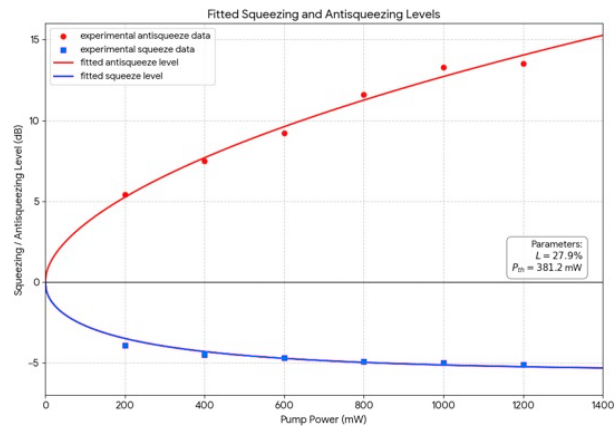
수행기관	개발 목표	개발내용 및 범위
ETRI (주관)	① 상용 모듈 이용 한 벌크 광학계 기반 압착광 생성	:-5.1 dB 수준 압착광 생성/측정 완료 ○ 압착광은 비선형 광학 프로세스인 SPDC (Spontaneous Parametric Down Conversion) 프로세스에 의해 발생되며, 1545 nm 레이저를 SHG (Second Harmonic Generation) 과정을 통해 772.5 nm 의 펄스 광 생성 후, 이를 다시 NTT의 PPLN 기반 OPA 모듈에 입력하여 1545 nm 대역의 압착광을 생성하게 됨

- 1545 nm 레이저의 일부를 분리하여 LO (Local Oscillator) 광원으로 사용하며, LO 광은 narrow band-pass filter로 ASE (Amplified Stimulated Emission) 성분을 제거 후 50:50 beamsplitter로 압착광과 간섭시켜 이를 호모다인 검출 모듈로 검출하며, beamsplitter interference의 visibility는 98% 이상이 되도록 하였음



✓ 2026년 전용 광학테이블 구축
✓ 하반기 입고 가능

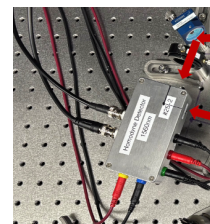
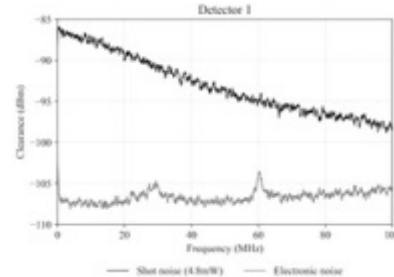
(좌) shot-noise (상) 및 squeezed light (하)
(우) LO 위상에 따른 노이즈 레벨 (붉은 선이 vacuum level)



772.5 nm 펌프 파워에 따른 압착 수준

- 12 W 의 1545 nm 레이저를 통해 1.5W 수준의 SHG 펌프광을 얻었으며, NTT module에 500 mW 입력시 -5.1 dB 수준의 압착을 얻을 수 있었음

총 5개 호모다인 검출 모듈 제작

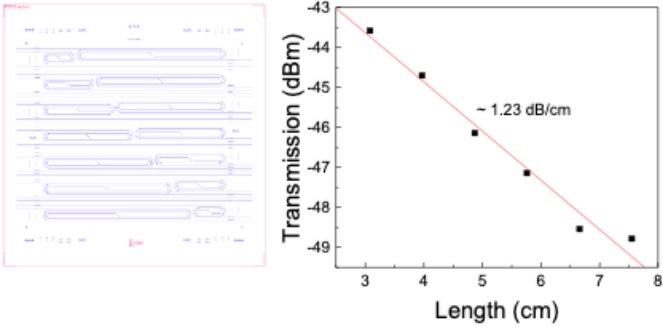
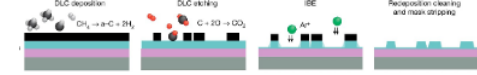
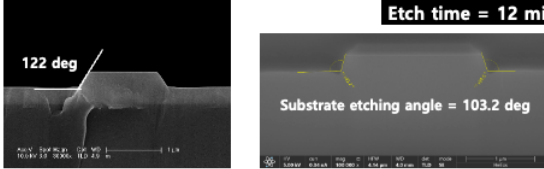


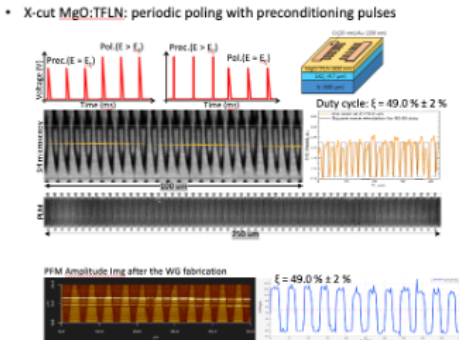
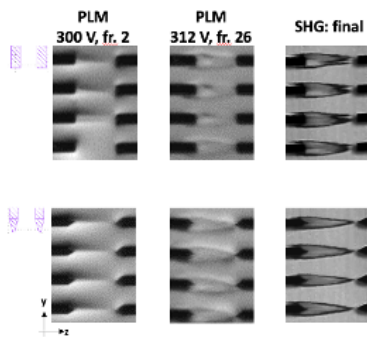
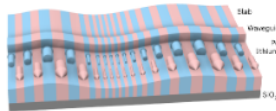
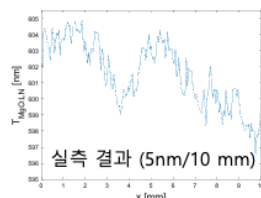
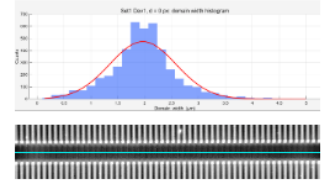
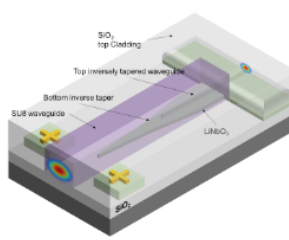
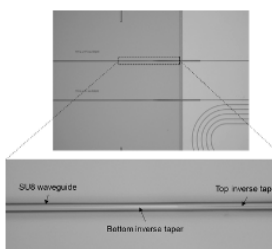
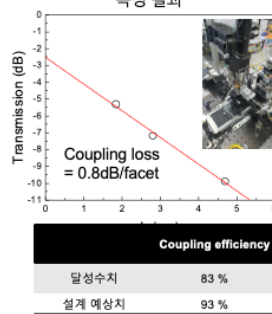
현재 사용중인 호모
다인 모듈

② 호모다인 검출
모듈 자체 제작

호모다인 모듈 특성 결과

- 총 5개의 호모다인 검출기 모듈을 제작하였으며, 95% 이상의 quantum efficiency를 보장하는 미국 Fermionics 사의 500 um x 500 um PD 모듈을 사용하였음
- Electrical noise와 shot noise 간의 차이를 의미하는 clearance는 1~2 MHz에서 21 dB로 나타났으며, 3dB bandwidth는 20 MHz로 확인됨

		성능 개선을 위한 고효율 모듈 제작  신규 제작한 호모다인 모듈 ○ 노이즈 특성 개선 및 보다 고성능의 PD (LaserComponents, QE>98%)를 적용하기 위한 호모다인 모듈을 신규로 제작함
	③ DLC 기반 도파로 패터닝 및 식각 기술 개발	기존 식각공정 최적화, 도파로 제작 및 손실 측정 (cut-back 및 cavity 측정)  ▪ MgO doped TFLN single mode waveguide (width ~ 800 nm) propagation loss ~ 1.23 dB/cm ○ 도파로 식각 공정을 최적화하여, 공진기 Q-factor 기준 1000만 이상의 높은 Q-factor 달성 ○ Cut-back method로 측정 결과 실제 사용하는 도파로의 손실을 측정한 결과 ~1.23 dB/cm로 확인되었음 저손실 도파로 형성이 가능한 DLC 기반 도파로 식각 기술 개발   기존 FOX-16 etching mask DLC etching mask ○ 도파로의 scattering loss를 줄이기 위해 측벽 roughness 개선이 가능할 것으로 생각되는 diamond-like carbon hard mask를 이용한 리소그래피 및 식각 조건 개발
	④ 대면적 주기분극 공정 개발 및 adaptive periodic poling 기술 개발	Mg-doped PPLN을 위한 대면적 주기분극 파형 개발 완료

	• X-cut MgO:TFLN: periodic poling with preconditioning pulses  PLM 300 V, fr. 2 PLM 312 V, fr. 26 SHG: final  PFM Amplitude Img after the VPO fabrication $\xi = 49.0\% \pm 2\%$ ○ 광학적 damage threshold가 congruent LN에 비해 높은 Mg-doped TFLN을 이용한 대면적 periodic poling 기술 개발 ○ 최적 poling 전압 파형 및 전극 기하구조 개발하여 10mm 길이의 ppln 영역 형성 기술 개발 Adaptive periodic poling 기술 적용, 실제 소자 공정 진행 중  상용 LNOI 기판 두께 균일성 문제로 인해 비선형 변환 효율 감소 → 주기분극 주기/도파로 폭 조정 → 적용형 구조 (Adopted structure)  실측 결과 (5nm/10 mm)  평균 duty: 0.425 Std: 0.133 ✓ 총 7매 샘플에 대해, 도파로 형성부의 두께를 실측 ✓ Reflectometry/Ellipsometer 측정 통해 비교검증 ✓ Mapping 결과의 정확성을 통계적으로 검증 ✓ 주기분극 주기 및 도파로 폭을 이에 맞추어 설계, 공정 수행 중 ✓ 비선형 변환 구간 길이는 10 mm로 설계, 고효율 기대 ○ TFLN 두께의 불균일성으로 인한 비선형 변환 효율 저하 문제를 해결하기 위해, 기판 두께에 맞추어 국부적 poling 주기를 조정하여 전극 패턴을 형성하는 adopted periodic poling 공정 개발 ○ 10 mm 길이에 대해 약 5 nm 수준의 두께 변화가 확인되었으며, 이를 반영한 실제 샘플을 7매 준비, 차년도 상반기 까지 공정 완료 후 측정 예정						
⑤ 칩-자유공간 저손실 커플링 기술 개발	Mode Size converter 제작 및 측정 완료 (83% 결합효율, 클래딩 적용)  완성된 모드사이즈 변환기 광학 사진  측정 결과  Coupling loss = 0.8dB/facet <table border="1"><thead><tr><th colspan="2">Coupling efficiency</th></tr></thead><tbody><tr><td>달성수치</td><td>83 %</td></tr><tr><td>설계 예상치</td><td>93 %</td></tr></tbody></table> • Fiber coupler 기준으로, 자유공간 커플링 시 보다 높은 효율 및 15도 발산각 예상 ○ 1550 nm 대역의 압착광을 칩으로부터 광섬유로 혹은 자유공간으로 효율적으로 커플링하기 위한 mode size converter 구조를 개발하였음 ○ 2단 taper 구조를 적용하고 SU-8 도파로를 적용하여 설계 결과 92% 수준의 결합효율을 갖는 구조를 개발하였음 ○ 실 제작하여 효율 측정 결과, 83% 수준의 결합 효율 확인함	Coupling efficiency		달성수치	83 %	설계 예상치	93 %
Coupling efficiency							
달성수치	83 %						
설계 예상치	93 %						
⑥ 모듈 제작 기술 개발	제작된 칩 패키징을 위한 모듈 제작 완료						

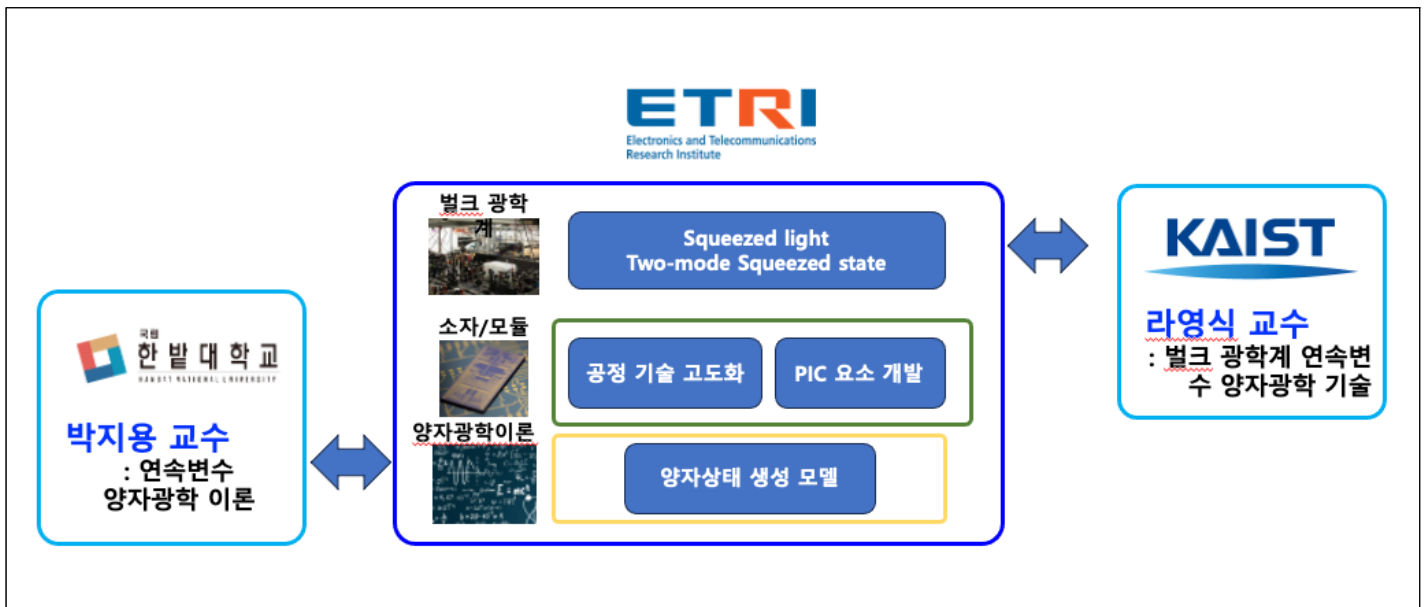
		Fiber block 집적화된 양자광학 소자 패키징. 자유공간 커플링시 출력부 pigtail 패키징은 진행하지 않고, 모듈 출력부 일부 수정 후 진행 가능하며, 테스트를 위해 SU8 광도파로 소자를 이용, 실제 칩 집적 가능 여부 확인. 소자 온도 제어 보드 포함, 집적화 ○ Fiber block을 이용한 다중 입/출력 가능한 fiber-pigtailed package 개발 ○ Fiber block, 온도제어보드 등 제작 완료
KAIST (위탁 1)	① 공진기 기반 압착광원 성능고도화	공진기 기반 압착광원 ○ 10 mm 길이를 갖는 PPKTP 결정을 공진기 내에 넣어 SPDC 과정을 이용한 압착광 생성 기술을 연구 ○ 공진기 제어 고도화, 손실 최소화 등을 통해 6 dB 수준의 압착광 얻음 1 Spectrum Scale/Div 3 dB Log Ref Level -47.17 dBm Center 5.000000 MHz Res BW 300 kHz #Video BW 51 Hz Sweep 2.00 s (3001 pts) Span 0 Hz 압착광 측정 결과 (하늘색: Vacuum, 초록/빨강/마젠타: 압착광)

	② EPR 양자얽힘 광원 제작	양자얽힘광원(좌) 측정 결과 (우) ○ 편광 얽힘 2-mode squeezed state를 이용한 EPR 얽힘 생성 및 측정 ○ Duan inseparability criterion으로 검증, 양자얽힘 확인
한밭대학교 (위탁 2)	①비가우시안 양자상태 정량화 모델 개발	○ Photon subtraction 기반의 비가우시안 상태 생성 (cat state)의 경우에 있어서, 빔가르개 반사율, 초기 압착 수준, 검출기 효율과 같은 측정 파라미터별 비가우시안 상태 위그너 함수 계산 모델 개발 ○ Wigner negativity 기반의 비가우시안성 정량화 기법 개발

3. 과제수행기간 추진체계 및 방법

가. 과제수행 추진체계

- 당해연도 연구개발 추진 체계는 다음과 같음
 - 벌크 광학계 기반 Squeezed light 생성 기술은 OPO, 상용 OPA 등의 방법을 상호 비교
 - 공진기 locking 및 위상제어 기술 개발
 - KAIST 라영식 교수와 위탁 등으로 연구협력 강화
 - 기존 PPLN 공전 기술 고도화, 손실 저감을 위한 신규 공정기술 및 PIC 요소 설계
 - Mode size converter 구조 적용, 칩 제작 적용

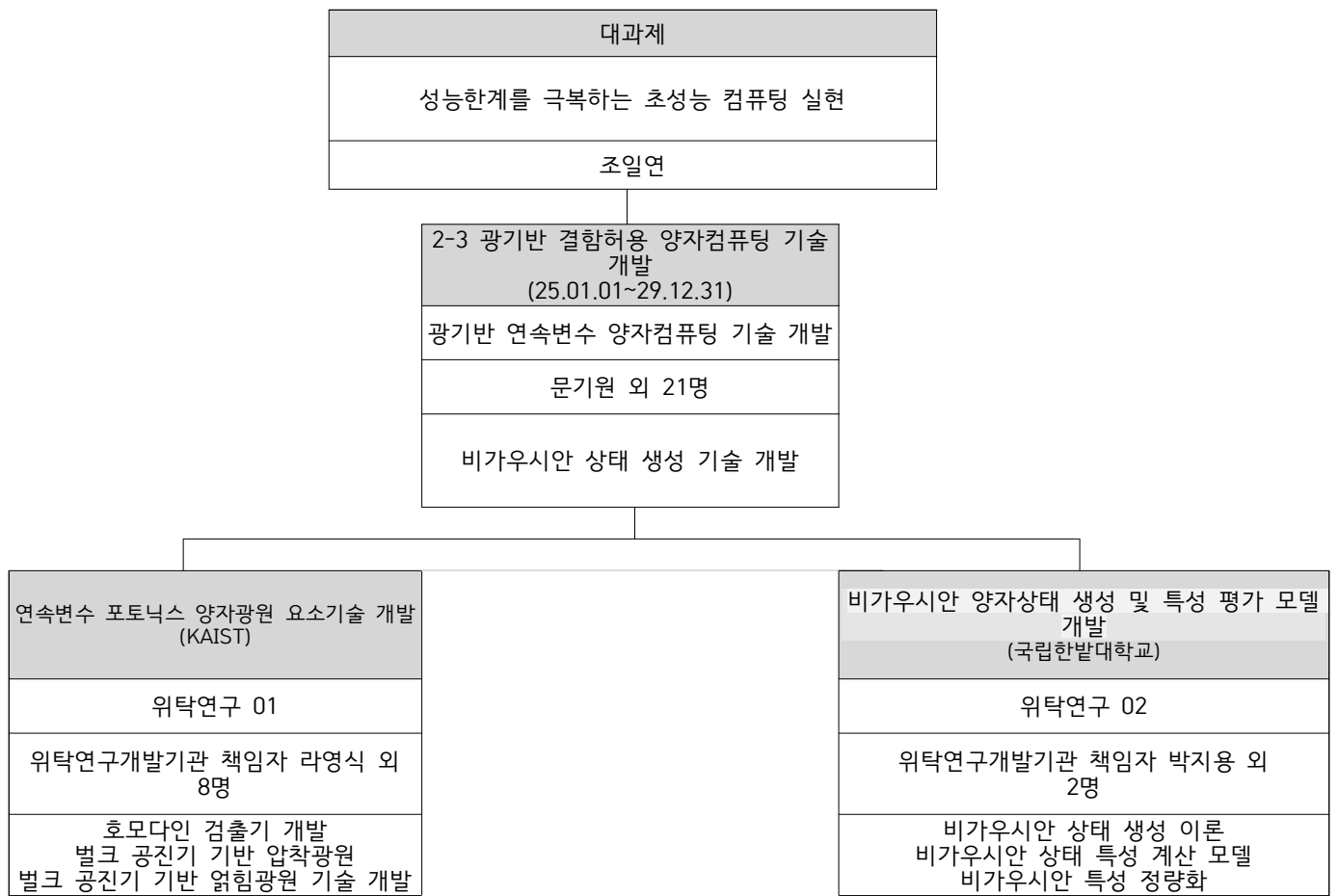


나. 과제수행 방법

□ 연속변수 연속변수 양자광학계 구현 기반 원천기술 개발

- 연속변수 양자압축광원 기술 개발 (ETRI, KAIST)
 - 단일모드 양자압축광원 구현 기술 설계
 - 양자압축광원 생성기술 연구 및 실험을 통한 구현
- 연속변수 양자상태 제어 및 측정 기술 개발 (ETRI)
 - 연속변수 양자상태를 제어하기 위한 광집적회로 설계 및 공정 기술 연구개발
 - 양자호모다인 측정 모듈 설계 및 기술 구현
 - 호모다인 측정 모듈 성능 고도화 및 제작 (4 모듈 이상 구축)
- 벌크 광학계를 이용한 Squeezing 광원 연구
 - NTT 상용 OPA 모듈을 이용한 Squeezing 실험 수행 예정
 - Squeezing 수준을 제고하기 위한 공진기 안정화 기술, Squeezing 수준 평가를 위한 호모다인 측정 및 양자 토모그래피 등 연구 수행
 - 본 사업에서 사용하기 위한 고순도 레이저, 광자계수시스템, 상용 FPGA 플랫폼 및 관련 교육 등 추진
 - U Tokyo, Riken 등과 협력 연구 가능성 타진 및 기술교류 등 수행
- 양자광집적회로 기반기술 연구
 - 기 확보한 PPLN 양자광집적회로 공정 기술 고도화 추진
 - 도파로 손실을 더욱 낮추기 위한 공정기술 (Diamond-like carbon 적용, CMP 적용 등 고려) 연구 및 모드변환소자 공정 안정화 및 설계 개선을 통한 효율개선 추진
 - 보다 높은 이차비선형 효율을 얻기 위한 대면적 adaptive poling 기술 개발 추진 및 poling dynamics 관련 연구 수행
- 양자광학 이론 연구
 - 양자상태에 대한 간섭계/손실 등의 영향 평가와 다중모드 계산을 위한 프로그램 등 제작

다. 과제수행 편성도(세부기술 수행체계)



3 과제 수행결과 및 목표달성도

1. 과제 수행결과

구분	1단계 (성과)							
정량	논문		특허				기술이전	
	SCI(건)	비SCI(건)	해외(건)		국내(건)		건수	금액(백만원)
			출원	등록	출원	등록		
				1				
	•(사업화) •(표준화) •(기타)							
정성	(1) 고효율 호모다인 검출기 자체 제작							
	- 대규모 클러스터 상태 생성/측정 위한 기본 요소로, 필요 수량 확보 (4대 이상)							
	- 잡음 특성 개선을 위한 보드 및 패키지 개선							
	(2) 양자광학 소자 공정 기술 고도화 및 모듈 제작							
	- 대면적 PPLN 도파로 제작을 위한 e-beam lithography 및 저손실 식각 기술 개발 (cut-back 기준 ~1.23 dB/cm 손실 달성)							
	- 저손실 도파로 제작을 위한 DLC (Diamond-Like Carbon) hard mask 이용한 식각 공정 조건 개발							
	- 칩-광섬유 및 칩-자유공간 결합효율 향상을 위한 mode size converter 제작 기술 개발 (결합효율 80% 이상 달성)							
	- 비선형 변환효율 극대화를 위한 adopted periodic poling 기술 개발							
	- 자체 제작 칩 시스템 적용을 위한 광섬유 집적화 모듈 및 온도제어 보드							
	(3) 연속변수 양자광학을 위한 기본 분석법인 양자토모그래피 등 기술 확보							
	- 압착 수준 측정 완료 (~5.1 dB)							

※ 연구수행 결과: 연구개발과제 수행에 따라 발생한 정량적, 정성적 연구개발성과, 기타 계획하지 않은 성과 등

가. 세부 정량적 성과

[과학적 성과]

☐ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율

☐ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명

☐ 기술 요약 정보

연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용여부	허용방식

☐ 보고서 원문

연도	보고서 구분	발간일	등록 번호

☐ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

☐ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			기여율	활용 여부
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호	등록인	등록일	등록 번호		
1	광대역 편광 비민감 모드 사이즈 변환기 및 편광-경로 분리 장치	대한민국	김보성	진행중	-	-	-	-	-	20	활용

○ 지식재산권 활용 유형

※ 활용의 경우 현재 활용 유형에 √ 표시, 미활용의 경우 향후 활용 예정 유형에 √ 표시합니다(최대 3개 중복선택 가능).

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	기타

☐ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율

☐ 신기술 지정

번호	명칭	출원일	고시일	보호 기간	지정 번호

☐ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증 기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증 번호		

☐ 표준화

○ 국내표준

번호	인증구분 ¹⁾	인증여부 ²⁾	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류 ³⁾	제안/인증일자

* 1) 한국산업규격(KS) 표준, 단체규격 등에서 해당하는 사항을 기재

* 2) 제안 또는 인증 중 해당하는 사항을 기재

* 3) 신규 또는 개정 중 해당하는 사항을 기재

○ 국제표준

번호	표준화단계구분 ¹⁾	표준명	표준기구명 ²⁾	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식 ³⁾	제안자	표준화 번호	제안일자

* 1) 국제표준 단계 중 신규 작업항목 제안(NP), 국제표준초안(WD), 위원회안(CD), 국제표준안(DIS), 최종국제표준안(FDIS), 국제표준(IS) 중 해당하는 사항을 기재

* 2) 국제표준화기구(ISO), 국제전기기술위원회(IEC), 공동기술위원회1(JTC1) 중 해당하는 사항을 기재

* 3) 국제표준(ISO), 기술시방서(TS), 기술보고서(TR), 공개활용규격(PAS), 기타 중 해당하는 사항을 기재

[경제적 성과]

☐ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작 업체명	설치 장소	이용 분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황

□ 사업화 투자실적

번호	추가 연구개발 투자	설비 투자	기타 투자	합계	투자 자금 성격*

* 내부 자금, 신용 대출, 담보 대출, 투자 유치, 기타 등에서 해당하는 사항을 기재

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식1)	사업화 형태2)	지역3)	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

- * 1) 기술이전 또는 자기실시 중 해당하는 사항을 기재
- * 2) 신제품 개발, 기존 제품 개선, 신공정 개발, 기존 공정 개선 등에서 해당하는 사항을 기재
- * 3) 국내 또는 국외 중 해당하는 사항을 기재

□ 매출실적(누적)

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(달러)		
합계					

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)		현재까지	3년 후	5년 후
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
국외					
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획					
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)		현재	3년 후	5년 후
	수 출				

□ 고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)		합계
			yyyy년	yyyy년	
합계					

☐ 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

☐ 비용 절감(누적)

순번	사업화명	발생연도	산정 방법	비용 절감액(천원)
합계				

☐ 경제적 파급 효과

(단위: 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수)	기타
해당 연도							
기대 목표							

☐ 산업 지원(기술지도)

순번	내용	기간	참석 대상	장소	인원

☐ 기술 무역

(단위: 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	기 징수액	총 계약액	해당 연도 징수액	향후 예정액	수출/ 수입

[사회적 성과]

☐ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

☐ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

☐ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

☐ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타

□ 산업 기술 인력 양성

번호	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

□ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비

□ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

□ 연구시설·장비

구축기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

* 「과학기술기초법 시행령」 제42조제4항제2호에 따른 연구시설·장비 종합정보시스템을 의미

[그 밖의 성과] (해당 시 작성)

○

○

나. 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항 (해당 시 작성)

○

○

<참고 1> 연구성과 실적 증빙자료 예시

성과유형	첨부자료 예시
연구논문	논문 사본(저자, 초록, 사사표기)을 확인할 수 있는 부분 포함, 연구개발과제별 중복 첨부 불가)
지식재산권	산업재산권 등록증(또는 출원서) 사본(발명인, 발명의 명칭, 연구개발과제 출처 포함)
제품개발(시제품)	제품개발사진 등 시제품 개발 관련 증빙자료
기술이전	기술이전 계약서, 기술실시 계약서, 기술료 입금 내역서 등
사업화 (상품출시, 공정개발)	사업화된 제품사진, 매출액 증빙서류(세금계산서, 납품계약서 등 매출 확인가능 내부 회계자료) 등
품목허가	미국 식품의약국(FDA) / 식품의약품안전처(MFDS) 허가서
임상시험실시	임상시험계획(IND) 승인서

<참고 2> 연구개발성과의 등록·기탁 대상과 범위

구분	대상	등록 및 기탁 범위
등록	논문	국내외 학술단체에서 발간하는 학술(대회)지에 수록된 학술 논문(전자원문 포함)
	특허	국내외에 출원 또는 등록된 특허정보
	보고서원문	연구개발 연차보고서, 단계보고서 및 최종보고서의 원문
	연구시설 · 장비	국가연구개발사업을 통하여 취득한 3천만 원 이상 (부가가치세, 부대비용 포함) 연구시설·장비 또는 공동활용이 가능한 모든 연구시설·장비
	기술요약정보	연차보고, 단계보고 및 최종보고가 완료된 연구개발성과의 기술을 요약한 정보
	생명자원 중 생명정보	서열·발현정보 등 유전체정보, 서열·구조·상호작용 등 단백질정보, 유전자(DNA)칩·단백질칩 등 발현체 정보 및 그 밖의 생명정보
	소프트웨어	창작된 소프트웨어 및 등록에 필요한 관련 정보
	표준	「국가표준기본법」 제3조에 따른 국가표준, 국제표준으로 채택된 공식 표준정보[소관 기술위원회를 포함한 공식 국제표준화기구(ISO, IEC, ITU)가 공인한 단체 또는 사실표준화기구에서 채택한 표준정보를 포함한다]
기탁	생명자원 중 생물자원	세균, 곰팡이, 바이러스 등 미생물자원, 인간 또는 동물의 세포·수정란 등 동물자원, 식물세포·종자 등 식물자원, DNA, RNA, 플라스미드 등 유전체자원 및 그 밖의 생물자원
	화합물	합성 또는 천연물에서 추출한 유기화합물 및 관련 정보
	신품종	생물자원 중 국내외에 출원 또는 등록된 농업용 신품종 및 관련 정보

※ 국가연구개발혁신법 시행령 제33조 제4항

2. 목표달성도

가. 공통지표

구분	기본지표							
	지표명	총사업연도	1단계		2단계			3단계
			'25년도	'26년도	'27년도	'28년도	'29년도	'30년도
과학적 성과	SCI(E) 논문							
기술적 성과	국내특허(출원)	1	1					
	국내특허(등록)							
	국제특허(출원)							
	국제특허(등록)							
경제적 성과	기술이전(건)							
	기술료(억원)							

구분	심화지표							
	지표명	총사업연도	1단계		2단계			3단계
			'20년도	'21년도	'22년도	'23년도	'24년도	'25년도
과학적 성과	표준화된 IF 상위 20% SCI 논문(건)							
기술적 성과	특허활용률 (기술이전건수/ 특허등록보유건수)							
	국제표준승인표준 기고서(건)							
	3극 특허(건)							
경제적 성과	연구비 대비 기술료 수입(%)							

나. 자율지표 (해당 시 작성)

구분	자율지표			
	지표명	연간 평균 목표	1단계	
			'20년도	'21년도
과학적 성과				

구분	자율지표				
	지표명	연간 평균 목표	2단계		
			'22년도	'23년도	'24년도
과학적 성과					

구분	자율지표			
	지표명	연간 평균 목표	3단계	
			'25년도	
과학적 성과				

3. 목표 미달 시 원인분석 (해당 시 작성)

가. 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

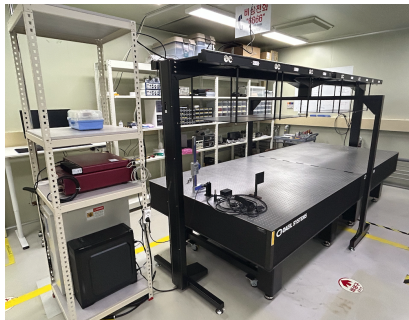
- 연구개발 1년차 후 종료된 과제로, 본 과제는 ETRI 전략에 따라 신규 과제로 통합되었음. 주요 장비 구축 계획 등은 연구개발 규정에 따라 1년차에 계획을 수립하고 2년차부터 실제 구축이 가능
- 소자 제작에 필수적인 전자선 리소그래피 장비의 사용이 원활치 않았음. 그 이유는 장비 노후화에 따른 낮은 가동률 및 본 과제의 소자 제작에 요구되는 대면적 stitching-error free 조건이 확보된 외부 공정 서비스가 없었기 때문

나. 자체 보완활동

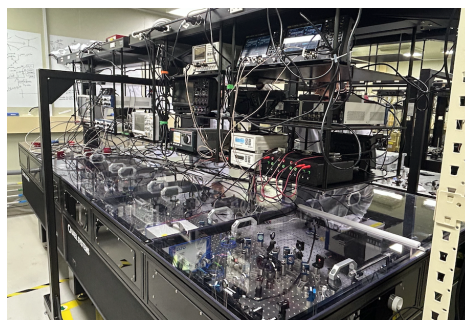
- 별도의 외부용역을 통해 전자선 리소그래피 공정을 확보하여 2025년 하반기 (9월)부터 개선된 조건으로 전자선 리소그래피 가능해짐

다. 연구개발 과정의 성실성

- 고효율 소자 제작을 위한 adopted periodic poling 공정 개발을 위하여 내년 구축할 예정인 박막 두께 매핑 장비 제조사의 데모 장비를 이용하여 수행
- 저손실 공정 개발을 위해 hard-mask인 DLC 이용한 공정기술을 e-beam lithography 방법이 아닌 stepper를 이용하여 조기 개발 노력
- 소자 부재 상황에서, 공식적 판매 제품이 아닌 NTT사의 OPA 모듈을 비공식적 접촉을 통해 조기 수급, 빠른 시간 내에 압착광원 측정 셋업을 구축하고 습득함
- 2025년 1월 기준, 광학 테이블과 레이저만 구축된 상황에서, 현재 2개의 압착광 측정 셋업을 조기 구축하였음.



2025.01 광학셋업



2026.01 광학셋업

- KAIST 라영식 교수와의 협업을 기반으로, 호모다인 검출기, 광정렬 기술 등 조기 습득
- 연속변수 양자컴퓨팅 및 양자광학 전문가인 일본 동경대 Akira Furusawa 교수, 체코 Palacky 대학교의 Jezek Misorav 교수 등 기관방문을 통해 광학 부품 및 실험 노하우 등 확보, 과제 활용
- 위 관련, 광학계 레이저 높이, 기계적 안정성이 확보된 광학 마운트, 고반사율 미러 제조사, FPGA 기반 하드웨어 등 다양한 실험적 노하우를 미리 확보하여 적용함

가. 과학적·기술적·경제적·사회적 파급효과

(1) 과학적·기술적 측면

- 연속변수 양자광학 기술 기반의 양자컴퓨팅 플랫폼은 타 양자컴퓨팅 플랫폼에 비해 얽힘 클러스터 생성 측면에서 압도적인 강점을 가지고 있음
- 현재 가우시안 연산 기반의 양자컴퓨터는 이미 시연되었으며 (동경대학교, 2025), GKP 상태와 같은 비가우시안 리소스의 확률적 생성 역시 빠른 속도로 발전하고 있음 (동경대학교, 2024, Xanadu, 2025)
- 동경대학교의 경우 일본 NTT의 OPA module 기반으로 시스템을 개발하여, OptQC라는 양자컴퓨팅 회사 설립, AIST에 납품 및 공동연구 수행 예정
- Xanadu의 경우 Ligentec과 같은 글로벌 파운드리 회사를 통해 핵심 소자를 제작하고 자체적인 광학 셋업을 구축하고 있음
- 본 과제 수행을 통해 연속변수 광기반 양자컴퓨팅 기술 개발 체계를 국내 최초로 구축
 - 광학 시스템 및 측정 기술: 압착 광원 측정 기술 확보
 - 소자/모듈 기술: PIC 기반 양자광원 제작 기술 개발
- ETRI 및 국내 역량으로 양자광학 시스템과 양자소자 기술을 동시에 확보 추진으로 연속변수 광기반 양자컴퓨팅 연구개발 기반 구축
- 핵심 인프라의 내재화/자체 구축을 통해 양자컴퓨팅 시스템 실현 가능

(2) 경제적, 사회적 측면

- 연속변수 양자광학 기반 양자컴퓨팅 기술은 대규모 클러스터 기반의 가우시안 양자컴퓨팅이 가능한 수준으로, 100개 큐모드 입력으로 선형 연산 수행 (기술 특성상 큐모드 확장은 매우 쉽게 이루어질 것이며, 고속화 원천기술 개발 중으로, 현재 70 GHz 클럭 양자연산 기술이 개발된 상태)
- 현재의 기술 수준은 양자 AI (즉, 기존 기계학습 기반의 AI 가속기로 양자연산을 추가하여 기계학습의 속도와 정확성을 높이려 하는 기술) 적용이 바로 가능한 수준으로, 궁극적 양자우월성 달성 이전에도 제약/물류 등 많은 분야에의 응용이 기대되고 있음
- 궁극적인 양자우월성을 달성하기 위해서는 비가우시안 리소스가 필수적으로, 이를 위해 동경대, Xanadu등 연구개발 수행 중임
- 본 과제 및 본 과제 관련 기본사업 (양자머신러닝 기술 개발)을 통해 중기/장기 양자컴퓨팅 기술 개발이 가능하고, 이는 기존의 인공지능 기술에 추가적 리소스를 제공할 뿐만 아니라 궁극적인 양자우월성 달성을 통해 큰 경제적/사회적 파급효과를 가질 수 있음

나. 후속 과제에 도움을 줄 수 있는 연구 결과

- (1) 압착광원 측정 기술은 향후 1차원/2차원 클러스터 상태 생성 기술의 기반 기술로, 특히 본 연구 및 관련 기본사업 (양자인공지능 기술개발)을 통해 위상 제어 기술까지 확보하여 향후 양자 AI 기술 개발을 위한 대규모 클러스터 상태 생성 기술로 확장할 수 있음
- (2) 리튬나리오베이트 기반 양자광집적회로 제작 기술은 양자통신/양자센싱 및 양자컴퓨팅 기술 전반에 활용 가능한 기반 기술로써, 후속 과제에 광범위하게 응용될 수 있음
- (3) 특히 양자컴퓨팅 분야에 있어서, 현재 벌크 광학계로 구성된 연속변수 광기반 양자컴퓨팅 시스템의 집적화 연구에 활용 가능함

5 성과관리 및 활용계획

가. 성과관리 현황 ※ 데이터 관리 계획(DMP : Data Management Plan) 참고

구분	주요내용			
데이터 생산 및 관리	o 연구데이터 간략 설명 - 연속변수 광기반 양자컴퓨팅 기술 및 양자광집적회로 기술 개발 내용이 포함된 연구데이터			
	연구데이터 유형	- 양자광학 시스템 구성도 - 양자광집적회로 공정 플로우 - 광학 특성 측정 결과	연구데이터 파일 포맷	pdf, gds, gif, tiff
	o 연구데이터 수집/생산 방법 - 양자광학 시스템 개략도에 따라 광학테이블에 시스템을 구성하고 출력 특성을 측정함 - 양자광집적회로 시뮬레이션 결과/공정 플로우에 따른 공정 수행 결과의 광학현미경 사진 및 전자현미경 사진 등 공정 관련 자료 수집 - 제작된 양자광집적회로 칩/모듈의 광학적/전기적 특성 측정 결과			
데이터 저장 및 보존	o 연구수행 중, 연구종료 후 연구데이터 보존 및 백업 방안 - 본 과제에서 발생하는 모든 연구데이터는 PDF 형태로 변환 후 연구데이터 관리책임자가 취합하여 보관하며, 기술문서의 형태로 한국전자통신연구원 내부 공개시스템에 장기적으로 보존될 예정 - 백업은 매월 연구데이터 관리책임자에 의해 진행			
데이터 공동활용	o 공동 활용가능한 연구데이터 종류 √①수치 √②텍스트 √③이미지 ④음향 ⑤동영상 ⑥기타()			
	o 공개 범위 ①원외공개 ②원내공개 √③메타데이터만 공개(원내) ④메타데이터만 공개(원외) ⑤비공개(사유선택)			
	o 공개의 경우, 공유 시점 ①당해 연구수행 중 ②당해 연구종료 직후 √③당해 연구종료 후 엠바고 지나서 (기간: 2년 후)			
	o 공개의 경우, 공개·공유 방법(라이선스 조건 기재) - 본 연구데이터는 지적재산권 확보를 위한 내용이 포함되어 있으므로 별도의 승인 허가 후 활용 가능함 - 상업적 이용은 불가능함			

나. 성과 관리 및 활용 계획

(1) 기술적

- 양자 AI, 양자컴퓨팅 기술 개발로 확장하여 국내 양자컴퓨팅 기술 인프라 확보에 기여

(2) 사회문제해결

- 제약/물류 분야에 응용, 노령화 및 에너지 문제 등 일정 수준의 기여

(3) 확보된 기술의 사업화 전략

- 양자 광집적회로 기술은 다양한 유관 분야에 응용 가능한 기술로, 양자통신/양자센싱/양자컴퓨팅에 필요한 모듈 형태로 별도 사업화 추진 가능
- 양자 컴퓨팅 기술은 단기적으로 양자 AI 기술 형태로써 사업화 추진 가능하며, 클라우드 서비스 기반으로 우선 추진, 향후 별도의 stand-off 장비로써 개발 가능

7

연구개발비 사용실적

연구개발비 사용실적 현황

과제책임자		성명	문기원			직위			기술총괄		
과제수행기간		전체			2025. 01. 01 - 2025. 12. 31(1 년 0 개월)						
연구개발기관의 연구개발비 (단위: 천원)		정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계		
					지방자치단체		기타()				
		현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계
총계		2,445,000							2,445,000		2,445,000
1단계	1년차	2,445,000							2,445,000		2,445,000
	2년차										
2단계	3년차										
	4년차										
	5년차										
3단계	6년차										

8

중요 연구변경 사항

구분 ¹⁾	변경 전	변경 후	변경사유 및 조치사항	변경근거 ²⁾
과제 조기 종료	2029.12.31.	2025.12.31.	연구원 기본사업 조정에 따른 조기 종료 및 신규 기본사업 시작	

* 1) 연구개발목표, 연구개발비, 연구개발기관, 연구책임자 등에서 해당 사항을 기재합니다.

* 2) 문서번호 또는 승인일자 중에서 해당 사항을 기재합니다.

[뒷면지]

주 의

1. 이 보고서는 한국전자통신연구원의 기본사업으로 수행한 개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 한국전자통신연구원에서 시행한 기본사업 결과임을 밝혀야 한다.