

양자기술용 가시광 및 근적외선 대역 고성능 파장 가변 레이저 기술 동향

Trends in High-Performance Wavelength-Tunable Lasers for Quantum Technologies in Visible and Near-Infrared Bands

최병석 (B.S. Choi, chbs@etri.re.kr)	양자통신연구실 책임연구원/기술총괄
김성일 (S.I. Kim, silkim@etri.re.kr)	광융합부품연구실 책임연구원
김현수 (H.S. Kim, kimhyunsoo@etri.re.kr)	광융합부품연구실 책임연구원
손정권 (J.K. Son, jkson@optowell.com)	옵토웰 연구소장
유종범 (J.B. You, jbyou@nnfc.re.kr)	나노융합기술원 선임연구원
이동춘 (D.C. Lee, dclee@phovel.com)	포벨 석좌연구원

ABSTRACT

Quantum information technology is driving innovative computing, communication, and sensing advancements. High-performance tunable lasers have become essential tools for precisely controlling and manipulating qubits. These lasers provide high stability and accuracy at specific wavelengths, enabling efficient control of various types of qubit systems, such as ions, neutral atoms, and defects. High-performance tunable lasers allow the initialization of qubit states, execution of quantum gate operations, and minimization of errors during the readout process. In addition, tunable lasers are critical in precisely regulating the interactions between multiple qubits to optimize quantum entanglement and correlation. This study explores the existing and state-of-the-art technologies related to the design and implementation of high-performance tunable lasers in the visible and near-infrared wavelength ranges that are crucial for key material systems used in quantum technology. Based on this investigation, we present new methodologies for maximizing the scalability of qubit control. These laser technologies are expected to contribute to the commercialization and performance enhancement of quantum information technology, a common foundational technology.

KEYWORDS 가시광, 광집적, 근적외선, 레이저, 양자

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2024.J.390507>

* 본고는 과학기술정보통신부의 재원으로 연구재단 및 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임[24]S3210, 양자 기술용 반도체 레이저 다이오드 광원 및 모듈 개발, 2019-0-00005, 근거리 저속 이동형 양자암호통신을 위한 편광기반 무선 양자키분배 송수신부 집적화 모듈 기술 개발, 2020-0-00890, QKD 프로토콜 간 상호 운용성 확보를 위한 신뢰 노드 코어 및 인터페이스 개발, 2022-0-01014, 경량형 무선 양자 중계 플랫폼 기술 개발, 2022-0-01014, 위성 양자 보안 통신을 위한 30km급 장거리 무선 양자 암호키 분배 전송 기술 및 위성 양자 암호키 분배(QKD) 핵심 요소기술개발].



본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

©2024 한국전자통신연구원

1. 서론

양자정보기술의 급속한 발전과 그에 따른 산업화에 대한 기대감이 높아지면서, 양자기술 자체뿐만 아니라 이를 뒷받침하기 위한 다양한 공통기반기술에 대한 관심도 함께 증가하고 있다. 레이저, 냉동기(Cryostat), 고주파 부품 등이 대표적인 기술로, 이러한 기술들은 양자컴퓨팅, 통신, 센싱 등이 실용화 기술로 자리 잡기 위한 핵심적인 역할을 할 것으로 기대되며, 이를 위해서는 양자정보기술에 적합한 형태로 관련 기술 개발이 이루어져야 한다.

공동(Cavity) 사이에 위치한 이득 매질에 광학 또는 전기적 펌핑을 가해 발생하는 유도 방출 효과에 의해 높은 결맞음 상태의 광을 생성하는 레이저는 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자센싱 분야에서 큐비트의 생성, 제어 및 측정을 위한 도구로 폭넓게 사용되고 있다. 스핀을 이용하는 대표적인 큐비트인 다이아몬드 질소빈자리(NV Center)를 예를 들어 설명하면 다음과 같다[1,2].

- 큐비트 생성: 녹색 레이저(532nm) 또는 노란색 레이저(575nm)로 질소공동을 여기하여 전하 상태를 초기화하고, 적색 레이저(637nm)를 이용해 스핀 상태를 초기화함으로써 큐비트를 이용 가능 상태로 만들
- 큐비트 측정: 적색 레이저(637nm)를 이용하여 공명 펌핑하여 특정 스핀 상태와 광자를 얽힘 상태로 만들고 방출된 광자를 검출하여 질소빈자리의 전자 스핀 상태를 측정

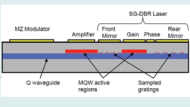
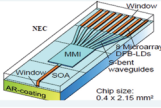
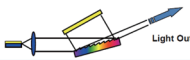
다양한 레이저의 성능 지표 중에서 양자기술에 적용하기 위해 갖추어야 할 주요 성능은 다음과 같다.

- 특수한 파장: 양자기술 분야에 사용되는 레이저는 원자의 전이 에너지와 같이 물질마다 다른 특정한 파장(자외선~근적외선)을 가져야 하며,

이를 정확히 맞춰 주기 위해 일정 수준의 파장 가변성이 요구됨

- 좁은 선폭: 양자 상태를 조작하고 읽기 위한 레이저는 특수한 파장에서 좁은 선폭(<1MHz)을 가지고 있어야 정밀 양자 제어 및 측정이 가능함
- 정확한 타이밍 및 에너지 제어: 양자 상태를 조작하는 데 사용되는 레이저 펄스의 타이밍과 에너지는 매우 정밀하게 제어되어야 하며, 이를 통해 양자 연산 및 상호 작용의 정확성을 구현 가능함
- 안정성 및 신뢰성: 양자기술은 매우 민감한 실험 및 응용을 포함하므로 레이저는 높은 안정성과 신뢰성을 갖추어야 함

파장 가변 레이저를 구현하는 방식은 그림 1과 같이 모든 구성요소를 반도체 칩 내부에 구현하는 단일 집적 DBR(Distributed Bragg Reflector) 레이저 방식, 좁은 파장 가변 범위를 갖는 서로 다른 파장대의 반도체 DFB(Distributed FeedBack) 레이저를 어레이로 만들어 구현하는 방식, 파장 가변을 담당하는 필터가 반도체 칩 외부에 존재하는 외부 공진기 레이저 방

Type	Technology	Pros	Cons
Monolithic DBR laser		<ul style="list-style-type: none"> - Monolithic - Size - Tuning speed - Power consumption 	<ul style="list-style-type: none"> - Complex control - Phase noise (linewidth)
DFB array		<ul style="list-style-type: none"> - DFB technology - Wavelength stability 	<ul style="list-style-type: none"> - Chip size - Coupler loss - Power consumption
External cavity laser		<ul style="list-style-type: none"> - Tuning range - Phase noise (linewidth) 	<ul style="list-style-type: none"> - Size - Tuning speed - Modulation speed

출처 Reprint from 이학규, 최병석, "5G용 초고속 파장 가변 모듈 개발," 최종보고서, 2019.

그림 1 파장 가변 레이저 기술 비교

식 등이 있다. 이중 양자기술에서 필요로 하는 파장 및 선폭과 같은 성능을 만족시킬 수 있는 기술적 성숙도를 갖는 방식은, 우수한 파장 가변성을 갖는 필터와 반도체 칩을 이용해 긴 공동을 구현할 수 있는 외부 공진기 레이저 방식이 유일하다고 볼 수 있다.

본고에서는 그 중요성이 점점 더 증대되고 있는 양자기술용 가시광 및 근적외선 대역 고성능 파장 가변 레이저의 기술 동향과 전망에 대해 기술하고자 한다.

II. 양자기술용 파장 가변 레이저 기술 동향

1. 파장대별 양자기술용 반도체 레이저 다이오드 광원의 필요성

현재 양자정보통신에 사용되는 다양한 큐비트로 인해 자외선부터 통신 파장 영역까지 다양한 파장대의 레이저가 필요하다. 그림 2는 양자 및 연관 기술에 필요한 레이저의 파장을 기술별로 표시한 것이다. 여기에는 이온 트랩 기술을 이용하는 칼슘, 중성 원자를 이용하는 루비듐 등의 원자와 다이아몬드의 질소빈자리와 실리콘빈자리, 실리콘카바이드(SiC)의 실리콘빈자리(Si Vacancy)나 이중빈자리(Divacancy) 같은 고체 물질의 파장이 포함된다. 대표적인 물질과 파장은 다음과 같다.

- 칼슘 이온: 이온 트랩(Ion Trap) 기술에 사용되는

대표적인 물질로 Doppler Cooling을 위해서는 397nm가 사용되며, 큐비트으로는 729nm를 전이 준위를 주로 사용함

- 질소빈자리: 다이아몬드 내에 인접한 탄소 두 개를 질소와 빈자리가 치환한 형태로 상온에서도 우수한 큐비트 성능을 보이는 고체 큐비트이며, 공명 펌핑 파장은 637nm를 사용하고, 음의 전하 상태를 유지해 주기 위해 532nm나 575nm의 파장을 사용함
- 루비듐: 중성 원자 트랩을 이용하는 기술에 사용되는 물질로 780nm의 파장은 레이저 냉각 및 트랩을 설치하는 데 사용됨. 또한, 이 파장은 비선형 효과를 이용해 편광 얽힘 광자를 통신용 C-band에서 만들어낼 때도 사용함
- 실리콘카바이드: 다이아몬드 질소빈자리와 비슷한 특성을 갖는 고체 점결함인 실리콘빈자리(861 또는 917nm)나 이중빈자리(1,078 또는 1,131nm)를 가질 수 있으며, 다이아몬드에 비해 가공성 등에서 훨씬 우수한 성능을 가짐
- 실리콘: 대표적인 반도체 물질로서 CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 공정을 이용해 소자를 만들 수 있기에 잠재성이 큰 물질임. 특히 T-center라고 불리는 스핀 큐비트는 전이 파장도 통신용인 1,326nm이기에 극저온 동작이라는 단점에도 불구하고 최근 활발히 연구가 이루어지고 있는 물질임

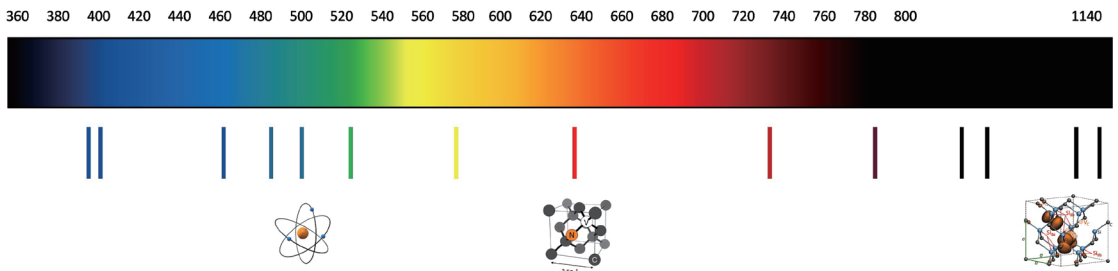


그림 2 양자 기술에서 고성능 레이저가 필요한 대표적인 파장들

2. 요소 기술 개발 동향

가. 이득칩 기술

반도체 이득칩은 물질이 가진 밴드갭을 사용하기 때문에 파장대에 따라 다른 물질을 사용하게 되는데, 500nm 대역 이하의 파장에서는 GaN 기반의 소자를, 630~1,100nm에서는 GaAs 기반의 소자를, 1,100nm 이상에서는 InP 기반의 소자를 사용하게 된다.

가시광 및 근적외선 대역의 외부 공진기 파장 가변 레이저용 이득칩은 자체 FP(Fabry-Perot) 공진 모드와 파장 가변 필터의 파장을 일치시켜 단일 모드 레이저를 만드는 Injection Locking 방식도 사용되고 있으나, 일반적으로는 반도체 칩 자체 FP 공진을 억제하기 위한 반사 방지막(AR Coating)을 포함하는 측면 발광 다이오드로 제작된다[3,6].

이 반사 방지막의 품질은 외부 공진기 레이저의 작동 특성을 결정하는 중요 요소가 되는데, 모드 불안정성(Axial-Mode Instability)을 방지하기 위해 반사 방지막 면의 반사율은 1.5×10^{-4} 미만이여야 한다[4].

이득칩의 한쪽 면에 낮은 반사율을 구현하기 위하여 각진 발광면(Angled Facet) 구조가 제안되었고 10^{-5} 수준의 반사도를 구현하게 되었다. 발광면의 각도를 조절하면 반사광이 도파로로 직접 결합하는 것을 방지하여 일반 반사 방지막에 비해 발광면의 반사율을 광대역으로 감소시킬 수 있다[5].

각진 발광면 구조는 복잡한 외부 파장 가변 필터와 정밀한 결합구조가 요구되는데, 각진 발광면이 하나의 형태로 되어있는 곡선 도파로(Curved Waveguide) 소자 구조가 제안되어 광대역 파장 가변형 SLD(SuperLuminescent Diode)와 같은 통신 소자에 활용되고 있다.

현재 이득칩 구조로 가장 많이 활용되고 있는 단일 각진 발광면(SAF: Single Angled Facet) 형태의 이득

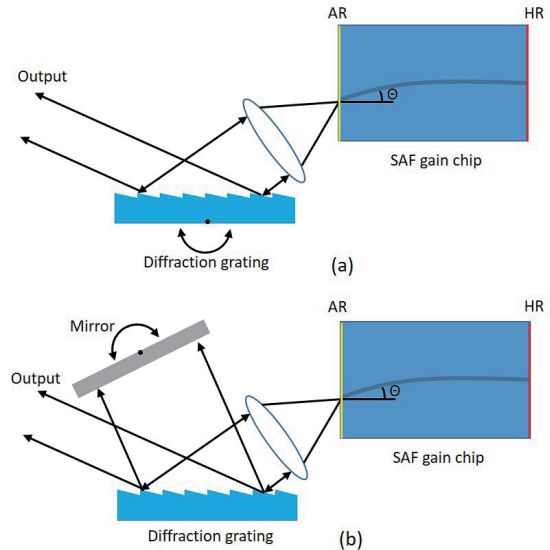


그림 3 각진 발광면 이득칩을 이용한 외부 공진기 레이저의 구조: (a) 리트로우 구성, (b) 리트만 구성

칩 구조는 1997년 메릴랜드대학교의 P.J.S. Heim에 의해 최초로 제안되어 외부 공진기 구성을 통해 넓은 파장 조절 영역과 스펙트럼 순도를 달성하게 되었다[6]. 해당 논문에서 제안된 SAF 이득칩(SAF-LD) 외부 공진기형 반도체 레이저의 개념도를 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)와 (b)는 각각 리트로우 구성과 리트만 구성을 나타낸다.

이후 다양한 연구들을 통해 780~1,550nm 파장의 적외선 영역 이득칩 제품들이 해외 기업(Toptica Photonics AG, Qphotonics, Thorlabs 등)을 통해 다양하게 판매되고 있다. Thorlabs 사는 1,220nm 대역 SAF 이득칩과 패키지를 개발하였는데, 발광면은 26.5도로 기울어져 설계되어 있다.

SAF 구조의 이득칩 구현을 위해서는 각 파장에 필요한 적절한 에피 구조를 갖는 반도체 기판과 코팅기술을 포함한 후가공 기술이 필요하다. 기판 성장 기술에 있어서는, SAF 이득칩 구조에서 발생하는 광손실을 보상하기 위한 효율 개선형 기판 구조와 광 흡수를 최소화하기 위한 기판 성능 확보가 필

수이고, 칩 공정 기술에 있어서는 기울어진 형태의 릿지 식각 구조와 미세 패턴 형성 기술이 필요하다. 특히, 성능을 좌우하는 면(Facet) 코팅 성능을 확보하기 위해서는 코팅면의 결함을 최소화하기 위한 후가공 기술과 정밀 코팅 기술이 필요하다. 국내에서는 통신용 파장 가변형 SLD 칩 기술이 연구되고 상용화되어 있으나 가시광 및 근적외선 파장 대역용 이득칩 연구가 진행되고 있지 않아 기초 연구가 절실히 필요한 상황이다.

나. 회절격자 기술

회절격자(Grating)는 빛이 격자 패턴을 통과하거나 반사할 때 발생하는 간섭 현상을 이용한다. 이러한 간섭으로 인해 빛이 여러 파장으로 공간적으로 분리되게 되어 특정 파장을 선택적으로 사용할 수 있게 된다. 그림 4는 회절격자를 이용해 입력광을 파장 성분별로 분리한 형상과 실제 회절격자의 모양을 보여준다.

회절격자는 반사형과 투과형으로 구분되며 세부적으로는 다음과 같은 소자들이 있다.

- Blazed(ruled) 격자: 표면에 고르게 분포된 미세한 홈들로 구성되어 있으며, 특정 회절 차수에서 최대 효율을 가지도록 설계되어 Blazed 파장

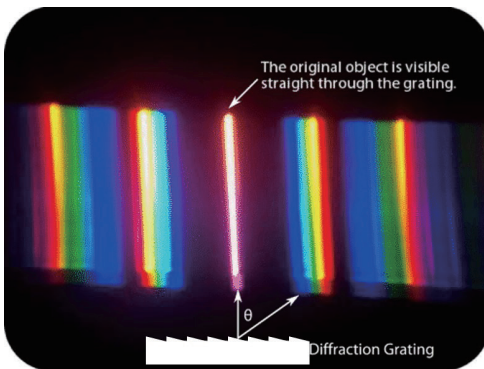
이라고 불리는 최적 파장이 존재한다. 제작 방법은 다이아몬드 공구를 이용해 정밀 홈을 새기는 방법, 레이저 간섭 패턴을 이용하는 방법, 나노 임프린트를 이용하는 방법 등이 있다.

- Holographic 격자: Blazed 격자가 가진 고스트 이미지가 높은 산란광을 줄여 더 정밀한 측정이 가능하게 할 수 있으나, 효율이 상대적으로 떨어지는 단점이 있다.
- Volume Phase Holographic 격자: 겹으로 드러난 홈이 없는 대신, 두 개의 유리 기판 사이에 위치한 디크로메이트 젤라틴(DCG) 필름을 통해 빛을 굴절시켜 투과형으로 사용된다. 이러한 구조는 광대역에서 높은 1차 회절 효율과 낮은 편광 의존성을 제공할 수 있다.

다. 모듈 제작 기술

이득칩 한쪽 면과 회절격자 사이에 레이저 공진기가 형성되는 외부 공진기 레이저는 파장 가변 특성이 좋고, 좁은 선폭을 구현할 수 있어 고성능의 레이저로 많이 사용되고 있는 형태이다. 외부 공진기 형태는 그림 3에 보이는 것과 같이 크게 리트로우 방식과 리트만 방식으로 나뉜다.

리트로우 구성은 SAF-LD, 시준 렌즈(Collimating Lens), 회절격자로 이루어진다. SAF-LD와 공진구조를 형성하는 회절격자를 조절함으로써 출력파장이 가변되기 때문에 광출력의 방향이 같이 변화하며, 조절 가능한 파장 영역이 좁다는 단점이 있다. 리트만 구성은 리트로우 구성에 반사용 거울이 추가된 형태이다. 리트만 구성은 SAF-LD와 회전하는 반사형 거울로 공진구조를 형성하고 파장을 가변한다. 회절격자는 고정되어 광이 두 번 지나가는 구조이다. 따라서 광출력의 방향을 일정하게 유지시킬 수 있으며, 좁은 선폭과 높은 파장 선택도를 확보할 수 있다는 장점이 있다. 파장 조절 거울에서 반사되는



출처 Reprinted from Candace, <http://www.flickr.com/photos/candace/315205005/> CC BY 2.0.

그림 4 회절격자를 통해 분광된 형상과 회절격자의 형상



그림 5 Toptica의 외부 공진기 다이오드 레이저(ECDL)/DFB 레이저와 DLC

0차(Zero-Order) 반사광이 손실됨으로써 리트로우 구성에 비하여 출력 파워가 낮다는 단점이 있다.

이득칩 및 시준 렌즈는 그림 3과 같이 고정하여 사용하게 되고 파장 선택을 위해 위치 조절이 필요한 회절격자나 거울 등은 피에조나 마이크로미터 수동 스테이지를 이용해 기계적으로 정렬해 원하는 파장을 맞춰야 한다.

이런 방식으로 제작된 레이저 중에 양자기술용으로 많이 사용되고 있는 Toptica사의 제품은 그림 5와 같이 계측기와 같은 규모의 장비로 구성되어 있다. 연속파 레이저와 파장 가변을 위한 광학계, 제어용 장치 등이 집적된 파장 가변 레이저 서브 시스템과 디지털 제어기 및 사용자 인터페이스 장치가 장비 형태로 별도로 구성되어 있는 형태로 전체적으로 큰 부피를 차지한다.

라. 레이저 주파수 안정화 기술

일반적으로 레이저 주파수의 안정도를 나타내는 지표인 레이저의 선폭은 주파수 대역의 특성이다. 레이저 선폭은 주파수 대역에서 레이저의 반치전폭(FWHM)을 측정하여 확인한다.

레이저 선폭은 레이저 자체의 특성과 레이저가 동작하는 환경, 측정하는 시간에 따라 변화될 수 있

다. 레이저에 인가되는 구동 전류가 수 마이크로초 동안 변화하면, 레이저 다이오드 내부 온도와 광도 파로의 굴절률이 변화되어 레이저 선폭에 영향을 준다. 또한, 수백 초 동안 발생하는 공기압이나 온습도의 변화는 순간 측정(Single-Shot)된 선폭에는 포함되지 않고 장시간 측정에서 레이저의 중심 주파수 드리프트나 지터로서 주파수 특성에 변화가 나타난다. 공기압력과 온습도의 변화는 외부 공진기 레이저 시스템에 피에조 드리프트를 발생시키고 불완전한 온도제어를 일으킨다.

좁은 선폭을 갖는 레이저는 측정 및 분석이나 센싱 분야에서 높은 해상도를 확보할 수 있어서 많은 관심을 받고 있는 소자이다. 반도체 레이저인 DFB 레이저와 비교하면 외부 공진기 레이저는 선폭을 수십 kHz까지 줄일 수 있다는 장점이 있으나, 온습도나 공기압 등 동작 환경에서 발생하는 잡음으로 인하여 파장 안정화와 제어 기술을 이용한 파장 잠금(Wavelength Locking)이 필요하다.

파장 잠금은 시간의 흐름에 따라서 변화되는 레이저의 위상과 주파수를 모니터링하여 레이저의 위상과 주파수가 시간이 변화하여도 설정한 값에 위치하도록 제어하여 안정화하는 과정과 기술이다. 일반적으로 파장 잠금은 폐피드백 루프(Closed Feedback Loop)를 이용하여 다음과 같은 순서로 이루어진다.

(1) 파장 잠금하고자 하는 레이저의 위상과 주파수를 기준이 되는 주파수와 비교한 후, (2) 비교한 결과를 기반으로 오류 신호(Error Signal)를 발생시키고, (3) 이를 제어 회로로 입력시키고, (4) 온도나 전류, 외부 공진기의 동작 조건 등을 변화시켜 레이저의 위상과 주파수를 변화시킨다. (5) 언급한 (1)에서 (4)까지의 순서를 반복하여 레이저의 파장을 잠금한다.

파장 잠금하기 위한 기준 주파수는 원자나 분자 전이(Atomic or Molecular Transition) 현상을 이용하는 방법이나 광학적 공진구조(Optical Cavity), 주파

수 빔(Frequency Comb), 안정화된 레이저(Stable Laser), Wavelength Meter 등이 사용된다. 원자나 분자 전이 현상을 이용하는 방법은 분광학에서 주로 사용되는 방법으로서 안정화시키고자 하는 레이저의 출력을 원자 셀을 통과시킨 후 광검출기로 투과된 광을 검출하고 검출된 결과를 피드백하여 파장 잠금에 활용하는 것이다. 일반적으로 수 MHz 수준의 주파수 선폴을 보장하고 있지만, 셀 속의 원자에 따라서는 도플러 효과가 극대화되어 0.3GHz까지 증가할 수 있다.

광학적 공진구조는 두 개의 거울이 마주 보고 있는 패브리페롯 간섭계(Fabry-Perot Interferometer)를 기반으로 한다. 두 거울 사이의 거리의 정수배가 되는 파장은 투과되므로 투과되는 양을 검출하여 파장 잠금에 활용한다. 장시간 안정도를 확보하기 위해서는 공진기의 온도 의존성이 낮아야 하며 작은 선폴을 확보하기 위해서는 공진 구조가 정교하게 설계되어야 한다. 그러나 설계 오차와 동작 환경 등의 변화로 발생하는 주파수 편이(Drift)가 존재할 수 있다.

주파수 빔은 레이저에 비하여 제어하기 편리한 RF(Radio-Frequency)로 광원을 변조시켜 RF 주파수에 대응하는 반복 주파수(Repetition Frequency)를 갖는 다수의 주파수 성분이 빛과 같은 형태로 만들어진 광원이다. 주파수 빔의 안정도는 반복 주파수가 일정하게 유지된다는 점에서 기인한다. 추가적으로 절대적인 안정도를 확보하기 위해서는 주파수 빔이 시작되는 오프셋 주파수(Carrier-Envelope Offset Frequency)가 일정하게 유지되거나 0이 되도록 구성되어야 한다. 이러한 주파수 빔은 원자시계의 장기간 안정도를 대체할 수 있으며 다수의 레이저 파장을 동시에 잠금할 수 있다는 장점이 있다.

안정화된 또 다른 레이저를 활용하는 방법은 안정화된 또 다른 레이저와 안정화시킬 레이저가 완벽히 동기화가 이루어져 높은 상관관계를 갖고 있

어야 한다. 두 레이저의 출력이 광검출기로 입력되어 출력되는 비트 신호의 주파수를 피드백하여 파장잠금에 활용하기 때문에 광검출기의 대역폭이 파장잠금의 한계로 작용할 수 있다.

Wavelength Meter를 이용하는 방법은 가장 단순한 방법이다. 하지만, Wavelength Meter의 정확도가 수 MHz 정도로 제한되어 있으며, 파장을 측정하고 제어하는 시간이 다른 방법에 비하여 길다는 단점이 있다.

상기한 여러 가지 기준 주파수와 차이를 갖는 레이저의 파장 변화는 광검출기나 카메라 등을 이용하여 전기신호로 변환한 후 오류 신호로 활용된다. 그림 6은 일반적인 오류 신호를 나타낸다. x축은 주파수(파장)이나 위상의 변화를 나타내며, y축은 전압으로 나타낸 오류 신호의 크기를 나타낸다. Lock Point는 파장 잠금이 설정된 값을 나타낸다. 그림에서 0점인 Lock Point에 위치하면 파장 잠금이 된 것이며, 양수로 움직이면 기준 파장에 대비하여 레이저의 파장이 큰 값을 가지고 있는 것이며, 음의 값을 가질 경우는 기준 파장에 비하여 레이저의 파장이 작은 경우를 나타낸다. 파장 잠금의 성능을 높이기 위해서는 오류 신호가 높은 신호 대 잡음비를 가져야 한다. 다시 말하면, 그림 6에서 0을 지나는 선형적인 위치에 있도록 오류 신호가 조절되어야 한다.

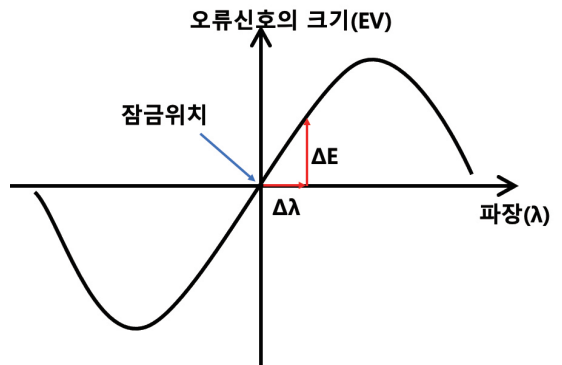


그림 6 오류 신호의 특성

제어 회로는 오류 신호를 입력받아 레이저의 파장을 조절하는 액츄에이터(Actuator)를 제어한다. DFB 레이저와 같이 내부에 공진기를 갖고 있는 레이저와 외부 공진기 레이저는 빠른 튜닝 속도와 넓은 튜닝 영역을 가지고 있으므로 통신부터 분광까지 넓은 응용 분야에서 활용되고 있다. 외부 공진기 레이저의 파장을 조절하기 위해서는 다이오드의 온도나 구동 전류를 제어하거나 회절격자(Grating) 각도나 위치를 변화시키는 피에조 전압을 제어하는 방법이 있다. EOM(Electro-Optical Modulator)이 내장되어 EOM에 입력되는 전압에 따라서 파장이 변화되는 외부 공진기 레이저의 경우는 EOM의 전압을 변화시키는 방법도 활용될 수 있다.

일반적으로 레이저 다이오드의 온도 조절을 통해 파장을 변화시키는 방식은 0.1nm/K의 변화율을 가지고 있고 시간이 매우 오래 걸리기 때문에 파장 잠금용으로 활용되지 않는다. 회절격자가 장착된 피에조의 전압을 변화시켜 회절격자의 각도와 위치를 변화시키는 방법은 파장 변화 비율이 약 1GHz/V이므로 수 kHz의 대역폭을 갖는 파장 잠금이 가능하며 낮은 주파수 편이에 대응할 수 있다. 레이저 다이오드의 구동 전류를 조절하는 것은 반도체의 반사지수(Reflective Index)를 변화시켜 파장을 변화시키는 방법으로서 일반적으로 0.1GHz/mA의 수준으로 변화가 가능하다. 레이저 다이오드의 선폭을 감소시키기 위하여 사용되는 일반적인 액츄에이터와 같이 레이저 다이오드의 구동전류를 변화시키는 것은 레이저 다이오드를 수 MHz로 변조시키는 것이다. 레이저 다이오드의 전류를 이용하여 파장 잠금과 피에조 전압을 변화시키는 방법을 같이 사용하면, 레이저 전류가 변화함에 따라서 레이저 출력파워가 변화하는 단점을 보상할 수 있다. 따라서 레이저 다이오드 전류를 변화시켜 파장 잠금하는 방법은 파장 변화가 작고 좁은 영역에서 발생할 경우 효과적이다.

III. 최근 연구 동향

1. 집적화 칩 기반 레이저 기술

현재 사용되고 있는 회절격자를 이용한 레이저는 개별 레이저마다 수동 또는 Motorized Stage를 이용한 기계식 정렬을 통해 레이저 공진기 구현하고 있어 소형 모듈화 및 대량 생산에 한계를 가지고 있다. 최근 SiN 공정기술의 발전으로 칩 기반의 파장 가변 필터 성능이 향상되고 있어, 이득칩과의 이종접합 구조로 외부 공진기 레이저의 구현이 가능해지고 있고 이에 따라 여러 기관에서 이러한 형태의 레이저를 개발하기 위해 노력하고 있다[3,8,9].

가. 이득칩 기술

고출력 이득칩을 구현하기 위해서는 이득칩의 에피층 구조 및 도핑 설계가 매우 중요하며, 이때 도핑층의 흡수 손실 및 직렬저항 감소가 주요 고려 대상이다. 직렬저항은 에피층의 도핑농도를 증가시킬수록 감소하지만, 도핑에 따른 흡수손실 또한 증가함으로 서로 상충관계에 있다.

일반적으로, GaAs 및 AlGaAs 층에서 n형 도핑층이 p형 도핑층보다 흡수손실 계수가 3배 정도 작다. 그리고, 직렬저항 측면에서도 Hole보다 Electron의 Mobility가 크게 때문에 같은 두께에서 p형보다 n형의 저항이 훨씬 적게 된다[10,11].

그림 7에 GaAs 이득칩의 대표적인 에피 구조를

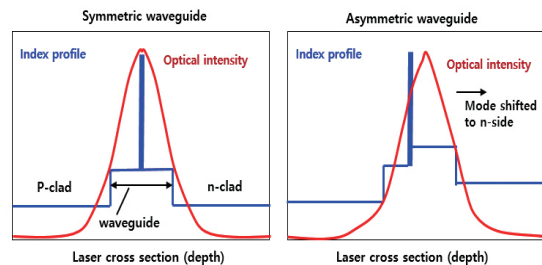


그림 7 GaAs 이득칩 에피 구조

나타내었다. 대칭 도파로 구조는 이득층 양단의 Clad층 및 Waveguide층의 굴절률과 두께를 동일하게 구성하는 형태이고, 비대칭 도파로 구조는 n형 Clad 및 n형 Waveguide층의 굴절률 및 두께를 p형 대비 더 크게 구성하는 형태로 광모드 분포가 전체적으로 n-side로 치우치게 된다. 앞서 설명했듯이, 고출력 GaAs 이득칩의 에피 설계는 낮은 흡수손실 및 낮은 직렬저항을 가지는 것이 바람직하므로, 광모드가 n-side로 치우쳐 있는 비대칭도파로 구조로 기본적으로 설계한다.

또한, 집적화 기술을 이용한 외부 공진기 레이저 제작을 위해서는 이득칩과 파장 가변 필터를 butt 결합해야 하기 때문에 이득칩과 파장 가변 필터 양단간의 광결합 손실을 최소화 및 정렬 허용오차를 크게 해야 한다.

그림 8은 비대칭도파로 구조에서 Waveguide층 두께에 따른 수직방향의 FFP(Far Field Pattern)의 반치폭을 나타내었다. Waveguide층 두께를 증가시킬수록 수직방향의 방사각이 감소하므로 파장 가변 필터와 광결합 손실 최소화 및 광결합 허용오차를 증가시킬 수 있다.

나. 파장 가변 필터 기술

광 집적화 기술은 양자 큐비트 확장성 제공을 위해 고집적 및 고밀도 양자 광집적회로를 실현하는

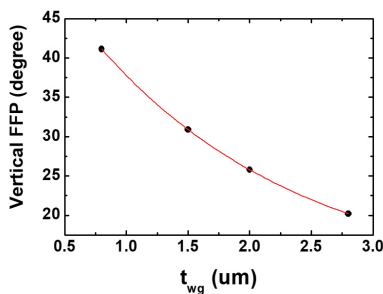


그림 8 Waveguide층 두께(t_{wg})에 따른 vertical FFP의 반치폭

기술로 각광을 받고 있다. 특히, CMOS 공정 호환성을 제공하는 광도파로 플랫폼은 전자회로와의 통합집적과 저가·대량생산의 이점을 제공할 수 있는데 표 1과 같이 응용하고자 하는 양자기술 분야의 요구사항에 따라 적절한 광도파로 소재를 결정할 수 있다.

외부 공진기 다이오드 레이저는 양자 큐비트의 생성, 제어 및 측정에 필수 부품으로 크게 이득칩과 파장 가변 필터로 구성될 수 있다. 파장 가변 필터는 입사하는 넓은 파장 대역의 광자 중 특정 파장의 광자만 가변 선택하는 기능을 제공한다. 양자 분야에서는 큰 부피의 기계식 파장 가변 필터를 활용하는 탁상형 ECDL 장비를 활용하고 있는데 향후 큐비트 확장성을 고려하면 ECDL 소형 모듈화를 위해 집적화 칩 기반 파장 가변 필터의 도입이 필요할 것으로 보인다.

파장 가변 필터의 광 집적화를 위한 방법으로 SiN 도파로 집적 기술이 널리 활용되고 있는데 Si 대비 비선형 손실에 자유롭고 Silica 대비 고 집적화에 유리해 협소 선폭과 확장성을 제공해야 하는 양자기술용 ECDL을 구현하기에 적합한 소재로 여겨진다. 또한, 가시광선부터 근적외선까지 넓은 투명 대역을 제공해 다양한 양자 응용에 적용이 가능할 것으로 판단된다. 최근 라이프니츠 하노버대학교는 파장 가변 필터와 양자 얽힘 광원을 단일 칩 상 실현하여 ECDL과 양자광집적회로가 통합 집적될 수 있음을 보인 바 있어 향후 양자 광 집적화 ECDL에 대한 지속적인 연구 개발이 이루어질 것으로 예상된다[12].

표 1 CMOS 호환 광 집적화 플랫폼

광도파로 소재	투명 대역 (um)	집적도	도파 손실	결합 손실	광변조
Silicon	1.1~8.5	+++	+	+	+++
SiN	0.3~8.0	++	+++	+++	++
Silica	0.2~3.5	+	+++	+++	+

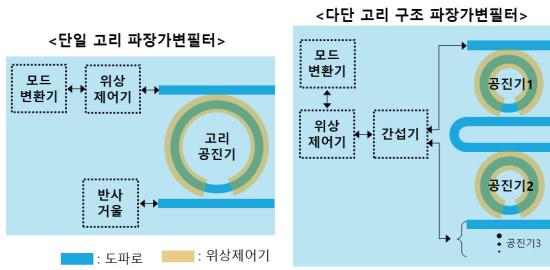


그림 9 파장 가변 필터 평면도 예시

SiN 파장 가변 필터는 그림 9와 같이 자기 주입 잠금 구조의 단일 고리 공진기로 구현되거나 버니어 효과를 적용하여 자유 스펙트럼 영역(FSR)을 확대할 수 있는 다단 고리 공진기로 구현될 수 있다. 고리형 SiN 파장 가변 필터는 크게 이득칩과 저손실로 광 결합하기 위한 모드 변환기, ECDL 전체의 종 모드를 파장 가변하기 위한 위상 제어기, ECDL 종 모드와 중첩하여 최종 레이징 파장을 가변하는 고리 공진기 및 동작 구조에 따라 도입될 수 있는 루프 거울 등의 반사기 소자로 구성될 수 있다.

SiN 파장 가변 필터는 활용하는 공진기의 높은 Q-factor 성능과 큰 모드 볼륨 성능을 통해 ECDL의 선폭을 최소화할 수 있는데 2021년 UCSB는 이러한 원리를 자기 주입 잠금 구조에 도입하여 40mHz에 달하는 매우 협소한 선폭 성능을 달성할 수 있었다[13]. 이와 같은 접근은 다단 고리 공진기의 개수를 늘리는 방식으로 달성할 수 있는데 이럴 경우 ECDL의 종 모드 간격 협소화에 따른 모드-홉-프리 특성 악화를 야기할 수 있다. 따라서 설계자는 개발하고자 하는 ECDL의 요구사항에 맞는 고리 공진기의 성능 사양을 적절히 적용해야 한다.

SiN 고리 공진기의 성능은 그림 10과 같이 활용되는 도파로의 종횡비에 따라 크게 좌우될 수 있다. 도파로의 종횡비가 낮을 경우 도파 손실은 개선되지만 밴딩 손실이 악화되어 우수한 선폭 성능을 얻을 수 있는 반면, 파장 가변 범위는 좁아지게 된다.

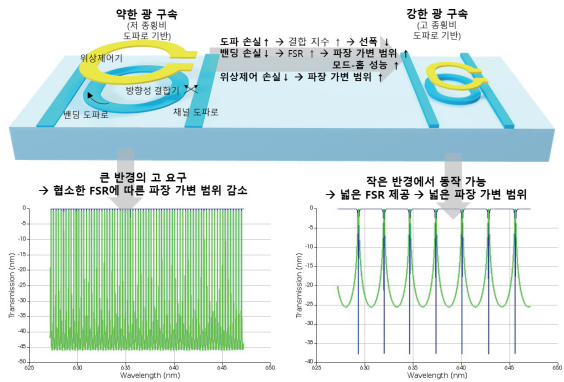
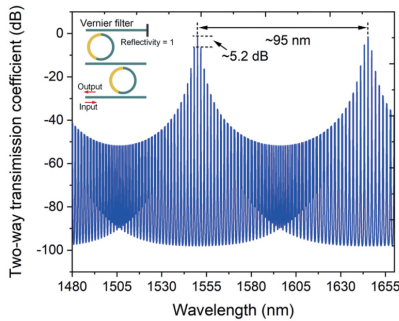


그림 10 도파로 종횡비에 따른 고리 공진기 특성

또한 광 모드가 수직 방향으로 느슨하게 구속되어 위상 제어를 위한 금속 열 저항선 이격 확장에 따라 위상 제어 전력 효율의 악화를 야기하게 된다. 따라서 낮은 도파로 종횡비 도입은 전반적으로 파장 가변 범위를 확대하는 데 불리하게 작용할 수 있다.

반대로 도파로의 종횡비가 높은 경우 도파 손실은 측벽 거칠기에 따라 낮아지지만 밴딩 손실은 개선되어 넓은 FSR을 얻을 수 있는 장점을 가지게 되고, 이러한 특성을 통해 단일 고리 공진기의 가변 범위 확대할 수 있다. 이와 같은 원리를 통해 2022년 콜롬비아대학교는 SiN 단일 고리 공진기 기반 파장 가변 필터를 적용해 가시광선 대역에서 1% 수준의 넓은 파장 가변 범위를 가지는 ECDL 개발하였다[14]. 하지만 고리 공진기 내의 높은 도파 손실은 결과적으로 낮은 Q-factor에 의한 ECDL 선폭 저하를 야기하는데, 이러한 양상은 2020년 트벤테대학교가 발표한 스파이럴 도파로를 위상 제어기와 고리 공진기 사이에 추가하는 방식으로 개선될 수 있을 것으로 판단된다[15].

파장 가변 필터의 파장 가변 범위는 버니어 효과가 적용되는 다단 고리 공진기를 도입함으로써 획기적으로 확대될 수 있다[16]. 버니어 효과는 서로 다른 반경을 가지는 고리 공진기를 2개 이상 직렬로 연결하여 다른 주기의 FSR이 중첩되어 전체 FSR이



출처 Reprinted from Y. Guo et al., "Hybrid integrated external cavity laser with a 172-nm tuning range," APL Photonics vol. 7, 2022. CC BY 4.0.

그림 11 넓은 파장 가변 범위를 제공하는 SiN 파장 가변 필터 투과 특성

증가하는 것을 말한다. 중국의 SJTU는 그림 11과 같이 2022년 SiN 이중 고리 공진기를 적용하고 각 고리의 둘레를 725 μ m 및 740 μ m로 적용하여 버니어 FSR을 95nm로 확장하고 이를 통해 1,550nm 대역에서 10% 이상의 넓은 파장 가변 범위 확보를 보고하였다[17].

다. 레이저 제작 기술

이득칩과 파장 가변 필터를 butt 결합한 외부 공진기 레이저는 그림 12(a)와 같이 광정렬된 두 칩을 UV 경화 에폭시로 접착을 하는 방식으로 제작한다 [18]. 이렇게 제작된 레이저는 기계적 정렬부가 없기 때문에 소형의 모듈화가 가능하고, 상대적으로 길지 않은 공동 길이로 10Gbps급 직접 변조도가

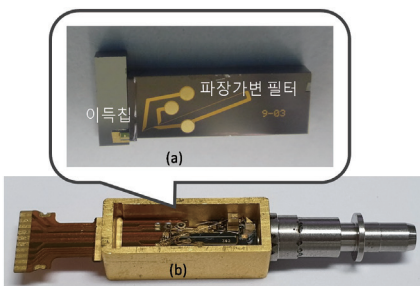


그림 12 (a) butt 결합으로 제작된 외부 공진기 레이저, (b) 레이저 패키지

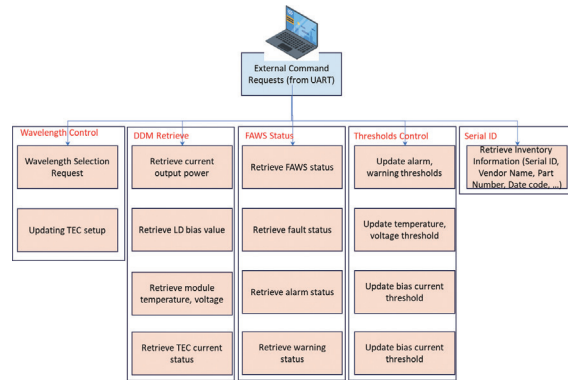


그림 13 레이저 제어 모듈의 기능별 구성

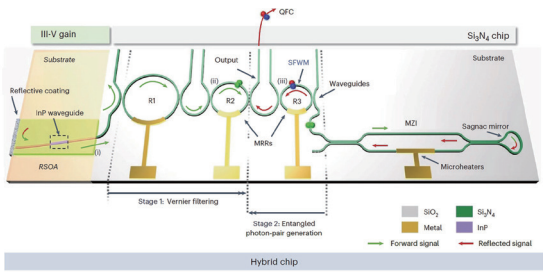
능하면서 Detuning 조절에 의해 좁은 선폭의 구현도 가능하다[18-20]. 파장 가변 레이저 부분은 그림 12(b)와 같이 금속 패키지 내부에 실장 후 밀봉하여 레이저를 구성한다.

그림 13은 제작된 레이저를 제어하기 위한 모듈의 기능별 구성을 보여준다. 레이저 구동을 위한 DAC 제어부, 파장 안정화를 위한 필터부를 구성하여 파장 가변 레이저의 성능을 검출하고 이 신호를 바탕으로 온도를 제어함으로써 파장을 고정하게 된다. 또한 광통신 모듈에서 적용되는 진단기법을 활용하여, 광신호의 세기, 레이저 구동 전류값, 모듈의 온도, 인가되는 전압값 등을 표시하게 되며, 외부 제어 인터페이스부(GUI: Graphical User Interface)에서 UART/USB/I2C 통신 방식을 통해 제어를 진행하게 된다.

양자 시스템의 활용성을 극대화하고 상용화하기 위해서는 양자 신호원인 양자 레이저의 소형화가 필수적이다. 이를 소형화하기 위해서 국내에 축적된 광통신 모듈 제작 방식을 활용할 경우, 가격과 크기에서 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 전망된다.

2. 레이저 집적 양자 광원 기술

최근 들어 집적화 칩 기반 레이저 개발과 더불어



출처 Reprinted from H. Mahmudlu et al., "Fully on-chip photonic turnkey quantum source for entangled qubit/qudit state generation," Nature Photonics vol. 17, 2023. CC BY 4.0.

그림 14 파장 가변 레이저 집적 양자 광원

이와 결합된 양자 광원 기술 결과들이 일부 발표되고 있다. 그림 14는 고리 공진기를 이용해 파장 가변 레이저를 구현하고, 여기에 자발 사광자 혼합(SFWM: Spontaneous Four Wave Mixing)을 이용해 광자 쌍을 형성한 결과이다[13]. 기존 양자 광원은 외부의 부피가 큰 레이저에 사용하게 되는데 이는 확장성과 실제 적용 가능성에 제한을 가질 수밖에 없다. 이 연구는 이러한 제한을 해결하여 양자 보안 통신 및 양자 정보 처리와 같은 실세계 응용에 적합한 확장 가능한 해법을 제공할 수 있다. 비록 구현이 쉬운 통신 파장 대역에서 비선형 현상을 이용한 양자 광원을 구현한 결과이나, 이러한 형태의 소자는 파장 가변 필터가 포함된 집적화 칩 기술의 발전과 더불어 가시광 및 근적외선 대역에서도 구현이 가능할 것으로 보인다. 더 나아가 양자 광원의 전자 또는 생성 기술과 결합하게 될 경우 다양한 집적화 소자의 구현이 가능할 것으로 보인다[21,22].

IV. 결론

본고에서는 양자 정보 기술의 발전을 뒷받침하는 고성능 파장 가변 레이저의 기술적 중요성과 최신 동향을 탐구하였다. 양자컴퓨팅, 통신 및 센싱 분야

에서 파장 가변 레이저는 큐비트의 정밀한 제어와 조작을 가능하게 하며, 다양한 물질계에서 높은 효율성과 정확성을 제공한다. 이러한 레이저는 특정 파장(자외선, 가시광선, 근적외선)에서의 안정성을 통해 큐비트의 생성, 제어 및 측정 과정에서 발생하는 오류를 최소화할 수 있다.

현재, 고성능 파장 가변 레이저 기술은 주로 외부 공진기 레이저 방식에 집중되어 있는데, 기존의 기계식 정렬에 의해 제작되는 레이저는 우수한 파장 가변성과 좁은 선폭을 구현할 수 있지만 큰 부피를 차지하는 단점을 가지고 있다. 이에 비해 현재 본격적으로 연구되고 있는 SiN 기반의 집적화 칩 기술을 이용한 레이저는 가시광 및 근적외선 대역을 포함한 다양한 파장 범위에서 양자 응용을 지원할 수 있는 중요한 진전을 이루고 있다.

향후 연구에서는 레이저의 집적화를 통한 소형화와 확장성에 더욱 중점을 두어야 하며, 이를 통해 양자기술의 상용화와 대중화를 위한 실용적이고 경제적인 해법을 제공할 필요가 있다. 국내 광통신 모듈 제작 기술을 활용한 양자 레이저 소형화는 가격 경쟁력과 크기 측면에서 유리한 위치를 제공할 수 있을 것이다. 이러한 기술적 진보는 양자정보기술의 다양한 응용 분야에서 혁신을 촉진하고, 양자컴퓨팅과 통신, 센싱의 실질적인 발전을 이끌 것으로 기대된다.

마지막으로 이러한 고성능 파장 가변 레이저는 전적으로 해외 선진 제작 업체의 제품을 수입해 사용하고 있는 상황으로, 국가 간의 양자기술 경쟁의 심화에 따른 수출입 통제 등의 상황이 발생할 가능성을 고려할 때, 양자기술의 기반 기술로서 반도체 레이저 다이오드 광원 및 모듈을 국내 기술로 개발하는 것은 매우 중요하기에 앞으로 과제화 및 상용화에 많은 지원이 따라야 할 것으로 전망된다.

용어해설

Nanopiezotronics 나노선/나노튜브와 같은 1차원 압전 나노 소재의 압전성과 반도체성의 coupling을 이용한 새로운 나노 전자/에너지 소자 기술

약어 정리

AR	Anti-Reflection
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
DAC	Digital Analog Converter
DCG	Dichromate Gelatine
DFB	Distributed Feedback
DLC	Digital Laser Controller
ECDL	External-Cavity Diode Laser
ECL	External Cavity Laser
FSR	Free Spectral Range
FWHM	Full Width at Half Maximum
GUI	Graphical User Interface
I2C	Inter-Integrated Circuit
NV Centers	Nitrogen-Vacancy Centers
SAF	Single Angled Facet
SLD	Superluminescent Diode
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UCSB	University of California, Santa Barbara
USB	Universal Serial Bus

참고문헌

[1] L. Robledo et al., "High-fidelity projective read-out of a solid-state spin quantum register," *Nature*, vol. 477, 2011, pp. 574-578.

[2] M. Pompili et al., "Realization of a multinode quantum network of remote solid-state qubits," *Sci.*, vol. 372, 2021, pp. 259-264.

[3] M. Corato-Zanarella et al., "Widely tunable and narrow-linewidth chip-scale lasers from near-ultraviolet near-infrared wavelengths," *Nature Photon.*, 2023.

[4] P. Zorabedian, "Axial-mode instability in tunable external-cavity semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, no. 7, 1994, pp. 1542-1552.

[5] W. Rideout et al., "Ultra-low reflectivity semiconductor optical amplifiers without antireflection coating,"

Electron. Lett., vol. 26, no. 1, 1990, pp. 36-38.

[6] P.J.S. Heim et al., "Single-angled-facet laser diode for widely tunable external cavity semiconductor lasers with high spectral purity," *Electron. Lett.* vol. 33, no. 16, 1997, pp. 1387-1389.

[7] <https://www.toptica.com/products/tunable-diode-lasers>

[8] C. Franken et al., "Hybrid-integrated diode laser in the visible spectral range," *Opt. Lett.* vol. 46, no. 19, 2021, pp. 4904-4907.

[9] L. Winkler et al., "Widely tunable and narrow-linewidth hybrid-integrated diode laser at 637nm," *Opt. Exp.*, vol. 32, no. 17, 2024, pp. 29710-29720.

[10] M. Peters et al., "High efficiency, high reliability laser diodes at JDS Uniphase," *SPIE*, 2005, pp. 142-151.

[11] P. Crump et al., "Efficient high-power laser diodes," *IEEE J. Selected. Topic. Quantum Electron.*, vol. 19, no. 4, 2013, p. 1501211.

[12] C. Xiang, "Silicon Nitride passive and active photonic integrated circuits: trends and prospects," *Photonics Research*, vol. 10, no. 6, 2022.

[13] H. Mahmudlu et al., "Fully on-chip photonic turnkey quantum source for entangled qubit/qudit state generation," *Nature Photon.*, vol. 17, 2023, pp. 518-524.

[14] B. Li et al., "Reaching fiber-laser coherence in integrated photonics," *Opt. Lett.*, vol. 46, no. 20, 2021.

[15] Y. Fan et al., "Hybrid integrated InP-Si3N4 diode laser with a 40-Hz intrinsic linewidth," *Opt. Exp.*, vol. 28, no. 15, 2020.

[16] B. Liu et al., "Wide tunable double ring resonator coupled lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 5, 2002.

[17] Y. Guo et al., "Hybrid integrated external cavity laser with a 172-nm tuning range," *APL Photon.*, vol. 7, 2022.

[18] B.-S. Choi et al., "10-Gb/s direct modulation of polymer-based tunable external cavity lasers," *Opt. Exp.*, vol. 20, no. 18, pp. 20368-20375, Apr. 2012.

[19] B.-S. Choi et al., "Evaluation of chirp reduction in polymer-based tunable external-cavity lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* 51, 2015, p. 2000315.

[20] B.-S. Choi et al., "Simple detuning method for low-chirp operation in polymer-based tunable external-cavity lasers," *Opt. Exp.*, vol. 23, no. 24, pp. 30657-30666, 2012.

[21] L. Labont et al., "Integrated photonics for quantum communications and metrology," *PRX Quantum* vol. 5, 2024, p. 010101.

[22] R. Katsumi et al., "Transferprinted single-photon sources coupled to wire waveguides," *Optica*, vol. 5, no. 6, 2018, pp. 691-694.