

광섬유 레이저의 최근 기술동향

정윤찬 · 김진섭 · 권영철 (서울대학교 공과대학 전기정보공학부)

1960년 T. Maiman이 최초로 루비 레이저를 개발한 이래로, 고체결정 레이저, 기체 레이저, 화학 레이저, 반도체 레이저 및 최근 각광받고 있는 광섬유 레이저에 이르기까지, 레이저 기술은 지속적으로 그 발전과 변신을 거듭하여 이제는 전기·전자, 물리·화학, 생물·의학 등 과학·기술의 영역을 넘어서 산업 및 국방에까지 없어서는 안 되는 기술로 자리매김하고 있다. 물리적인 현상을 규명하거나 이를 바탕으로 한 응용분야를 창출하는 도구로서 레이저 기술이 사용되어 왔음을 고려할 때, 새로운 레이저의 개발, 즉, 더 짧고, 더 빠르고, 더 강한 빛을 구현하는 것은 관련된 연구 및 응용분야의 혁신적인 발전을 이끌어 낼 수 있는契점을 의미한다고 해도 과언이 아니다. 그 한 가지 예로서, 불과 20여 년 전만 하더라도 상상할 수 없었던, 선택과 편리성의 범주를 넘어 이제는 우리 생활에서 필수불가결한 요소가 된 초고속 인터넷 역시, 고속으로 동작하는 레이저 기술 중의 하나인 광섬유 레이저 기술의 발전이 이루어 낸 결과라고 하겠다.

특히, 최근 반도체 레이저 및 광섬유 제조 기술의 급속한 발전에 힘입어 광섬유 레이저가 광통신 분야를 넘어서 고출력 레이저 및 응용분야에서도 많은 주목을 받고 있는데(1-9), 이는 고체 결정 레이저, 기체 레이저, 화학 레이저 등의 기존 방식의 레이저들에 비해 다음과 같은 장점들이 있기 때문이다.

- 이득 매질 광섬유 펌프 흡수율 및 레이저 발진 효율이 높음
- 광섬유 구조의 기하학적 특성상 외부 표면적 대 이득매질의 부피 비율이 커서 그 냉각 특성이 탁월함(킬로와트급 출력에서도 이득매질 냉각을 위한 외부 냉각수 사용이 불필요하거나 최소화됨)
- 열렌즈 현상으로 인한 매질의 손상이나 모드외극 현상으로부터 상대적으로 자유로움
- 광섬유만으로 레이저 시스템 구성 가능하여 자유공간 광학계(Free-space optics)의 사용이 불필요하거나 최소화됨
- 구조가 매우 단순하고 또한 집적화될 수 있어 시스템의 소형·경량화가 가능함
- 안정성과 내구성이 높고, 외부 충격에 따라 광학계 정렬이 흐트러질 우려가 없음
- 결과적으로 제작 및 운용 비용이 상대적으로 낮음

이러한 다양한 장점에 기인하여 최근까지 광섬유 레이저의 고출력화에 대한 많은 연구가 진행되어 오고 있는데, 최근 광섬유 레이저 분야의 새로운 연구 동향은 그 출력의 증대뿐만 아니라, 광섬유 레이저의 제한된 파장대역 특성의 완화와 출력 파장의 다변화에도 집중되고 있다. (참고로 “고출력 광섬유 레이저 기술 및 그 응용”과 관련해서는 참고문헌 [10]에 보

다 상세히 소개된 바 있다.) 이는 곧, 그 동안의 연구 개발로 입증된 안정된 레이저 광원으로서의 광섬유 레이저 기술(특히, 1 μ m 및 1.5 μ m 파장대역)를 더욱 확장하여 다양한 응용분야로 적용하고자 하는 노력의 일환으로 해석된다.

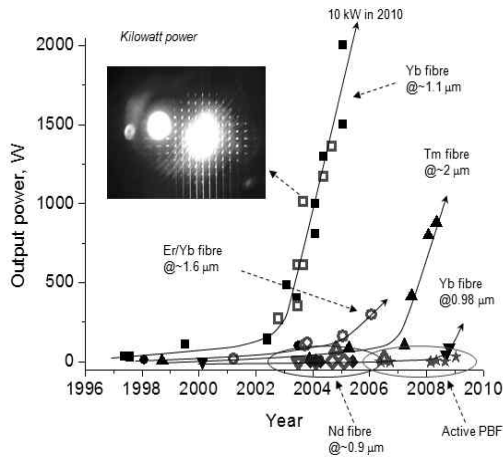


그림 1. 연속광 광섬유 레이저의 출력 세기의 발달:

속이 비어 있는 표식들은 본 서울대 레이저공학 및 응용 연구실 연구책임자와 영국 University of Southampton, ORC 연구 그룹의 연구수행업적을 표시한다. 내부 그림은 세계 최초로 개발된 1kW 이터븀첨가 광섬유 레이저의 광 형상을 보여 준다(10).

특히, 신개념의 고비선형성 광섬유를 이용한 초광대역 생성(Supercontinuum generation), 광 매개 처리(Optical parametric process), 라만 변환(Raman conversion) 등의 기술들이 활발히 연구되고 있는데, 이는 레이저 물질이 원천적으로 가지고 있는 파장대역의 한계성을 매질의 비선형성을 이용하여 극복하고자 하는 노력들이다. 그러나, 기존에 사용되어 오고 있는 실리카계열의 광섬유는 비선형계수가 상당히 낮기 때문에[11] 광섬유를 통해서 원하는 만큼의 비선형성을 얻기가 어려운데, 이를 위해서는 광섬유 코어의 유효 단면적을 현격히 줄이거나 광섬유 길이를 늘여야 한다. 광섬유 코어의 유효 단면적을 줄이는 데는 표면손상 임계값, 회절 임계값 등의 기술적

인 한계가 있으므로, 통상적으로 긴 길이(수십 미터에서 수십 킬로미터 이상)의 광섬유를 사용하게 된다. 이 경우, 서로 다른 파장 성분에 따른 색분산에 오히려 영향을 많이 받게 되어 그 효율적인 측면에서 많은 문제점이 발생하게 된다. 다시 말해서, 광섬유 길이를 늘이는 것만으로는 그 문제점을 원천적으로 해결할 수 없고, 광섬유 자체 내에서의 적절한 분산 특성과 비선형성이 동시에 보장되어야 하는 것이다.

이러한 문제점들을 해결하기 위한 기존의 방법은 기본적으로 고출력의 레이저 광원과 적절한 분산 특성과 고비선형성을 가지고 있는 수동형 광섬유를 순차적으로 조합하여 원하는 형태의 비선형 파장 변환을 유도하는 것이다. 다시 말해서, 다양한 형태의 광자 결정 광섬유(Photonic crystal fiber: PCF) 및 광자 밴드갭 광섬유(Photonics bandgap fiber) 등의 신개념의 광섬유 개발을 통해 원하는 형태의 분산 특성과 고비선형성을 동시에 만족시키하고자 하는데, 현재까지는 이러한 광섬유를 제작하는데 있어서 대부분의 경우 전술한 바와 같이 기존의 실리카계열 물질을 모재로 사용하여 오고 있다. 그 주요한 이유 중의 하나는 실리카계열 물질의 경우 배경 손실(Background loss)이 매우 낮기 때문에, 원하는 비선형성을 얻기 위해 긴 광섬유를 사용한다고 할지라도 그 물질의 배경 손실에 의한 전파 손실이 상대적으로 낮기 때문이다.

그러나, 만약 광섬유를 구성하는 물질 자체가 원천적으로 매우 높은 비선형도를 가진다면 이러한 실리카계열 광섬유 물질의 한계성을 뛰어 넘을 수 있는데, 최근 이러한 이유로 고비선형도를 갖는 비실리카계열 광섬유 물질에 대한 연구가 새롭게 각광을 받고 있다[12-16]. 일반적으로 비실리카계열 광섬유 물질은 광통신 파장대역, 즉, 1.5 μ m 파장대역에서 실리카계열 광섬유 물질에 비해 상대적으로 배경 손실이 크고, 또한, 비선형성이 커서 같은 신호를 왜곡 없이 멀리 전송하는 광통신 분야에 사용하는 것에는 큰 제약

이 따르게 되므로, 그 동안 많은 관심을 받아 오지 못했다. 그러나, 비실리카계열 광섬유의 높은 비선형성은 최근 각광 받고 있는 레이저의 파장 변환 및 광대역화에 매우 유용한 특성이다. 비실리카계열 광섬유 물질의 비선형성은 실리카계열 광섬유 물질에 비해 약 10~100배 이상으로 알려져 있다[11-16]. 뿐만 아니라, 비실리카계열 광섬유 물질은 오히려 3 μ m 이상의 중적외선(Mid infrared) 대역에서 실리카계열 광섬유 물질보다도 더 낮은 배경 손실 특성을 갖기 때문에 이에 대한 응용이 가능한 점도 또 하나의 장점이라 하겠다[17]. 표 1은 다양한 비실리카계열 광섬유 물질의 비선형도 대한 기존의 측정 결과들을 보여 주고 있다.

표 1. 다양한 종류의 광섬유 유리 물질의 굴절률과 이차 비선형굴절률 계수

Glass	n	n ² (m ² /W)	λ_{meas} (μ m)	Ref.
Silica	1.44	2.2 \times 10 ⁻²⁰	1.55	[11]
SF57	1.81	4.1 \times 10 ⁻¹⁹	1.06	[12]
SF59	1.91	6.8 \times 10 ⁻¹⁹	1.06	[12]
SF6	1.76	2.2 \times 10 ⁻¹⁹	1.55	[13]
As ₂ S ₃	2.4	2.0 \times 10 ⁻¹⁹	1.55	[14]
Tellurite	~2	~5.0 \times 10 ⁻¹⁹	-	[15]
GLS	2.41	2.16 \times 10 ⁻¹⁸	1.52	[16]
GLSO	2.25	1.77 \times 10 ⁻¹⁸	~1.5	[16]

이러한 특징들 외에도 비실리카계열 광섬유 물질은 실리카계열 광섬유 물질과 비교하여 여러 측면에서 장점 및 차별성을 갖는데 이를 정리하면 다음과 같다.

- 비선형도가 높음(실리카계열 광섬유 물질의 10~100배 이상)
- 근적외선 영역에서 배경 손실이 상대적으로 높으나, 중적외선 영역 이상에서는 오히려 더 낮음
- 란탄족계열 레이저 이득물질에 수용성이 높기 때문에 레이저 이득물질의 도핑 농도를 높일 수

있음

- 물질의 녹는점이 상대적으로 낮기 때문에 광섬유 제작 공정이 용이함
- 물질에 종류에 따라 굴절률 차이가 커서 도파로 구성 시 개구수(Numerical aperture)를 크게 할 수 있음
- 레이저 이득 물질 도핑 시 레이저 발진 및 비선형 파장변환을 동시에 얻을 수 있음

특히, 란탄족계열의 레이저 이득물질에 대한 수용성이 큰 특성은 이를 이용하여 레이저를 구성할 때에 필요한 광섬유 길이를 현격히 줄이 수 있게 하므로, 다소의 배경 손실이 있다 하더라도, 높은 레이저 발진 효율을 얻을 수 있게 하고, 시스템의 집적도를 제고하는 데 도움이 된다. 이러한 특성을 만족시키는 비실리카계열 광섬유 물질의 종류로는 실리카 물질의 산소를 불소로 치환한 Fluoroziconate 계열, 요오드로 치환한 Iodide 계열과 실리콘을 Bi, Pb 등으로 치환한 HMO (Heavy metal oxide) 계열, Ca, Al 등으로 치환한 Calcium aluminate 계열 등과 S, Se 및 Te 등의 Chalcogen 원소로 이루어진 Chalcogenide 계열 등 매우 다양하기 때문에 각각의 특성에 대한 장점들을 토대로 필요에 따라 다양한 응용 또한 가능하다. 그 가운데서도 Bi를 기반으로 하는 비실리카계열 광섬유 물질은 1.3 μ m 대역에서 300nm 이상의 반치폭을 갖는 광대역 방출 특성을 보여 주는데[18], 이 파장대역은 그림 2에 도시된 바와 같이, 현재로서는 일반적으로 활용되는 란탄족계열 레이저 이득물질을 도핑한 광섬유를 통해서는 직접 발진이 불가능한 파장대역과 상당 부분 겹쳐져 있다. 따라서, Bi 기반 비실리카계열 광섬유 개발에 대한 연구는 1.3 μ m 파장대역에서 광대역 및 광대역 가변 광원을 획기적으로 얻을 수 있는 가능성을 제시한다. 또한 이에 대한 성공여부는 그 기술적 파급 효과가 매우 클 것으로 기대된다.

더욱이 비실리카계열 광섬유 물질에 란탄족계열의

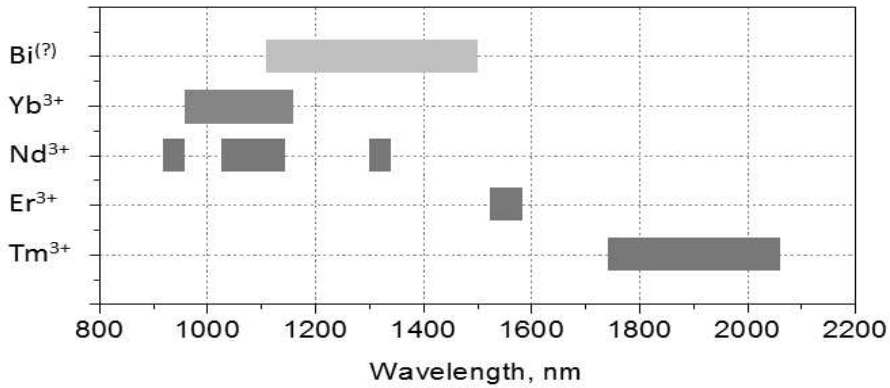


그림 2. 희토류 물질에 따른 방출대역에 대한 모식도. 1.2~1.5 μm 파장대역에서 효율적인 방출특성을 갖는 란타늄 계열 희토류물질이 없음을 나타낸다[19].

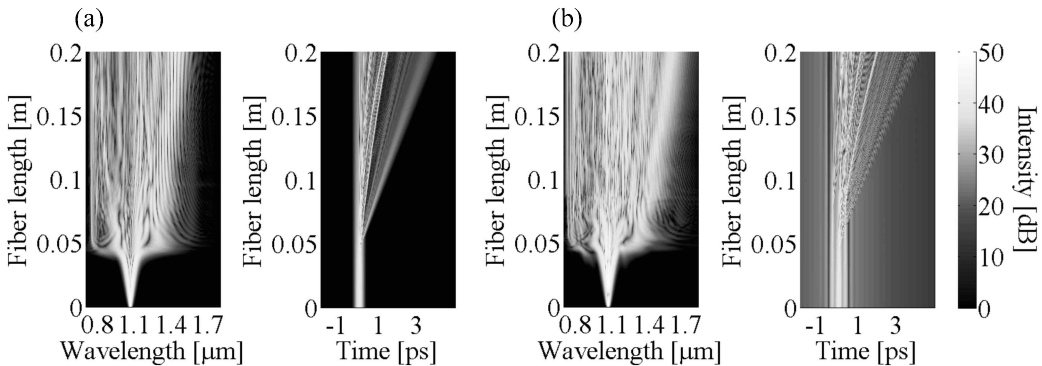


그림 3. 초광대역광 생성에 대한 수치해석 결과: (a) Gaussian 펄스 입력의 경우, (b) all-normal 펄스 입력의 경우

레이저 이득물질을 함께 도핑하고, 이를 광학적으로 펌핑할 경우, 고출력 레이저 광원과 비선형 광섬유를 순차적 연결하는 기존 방식을 탈피한 전혀 새로운 구조의 파장변환 레이저 시스템을 구성할 수 있다. 이에 대한 연구 결과는 현재까지 충분히 논의된 바가 없으며, 이 기술이 확립될 경우 초광대역 광원 기술에 있어서 그 파급 효과가 또한 매우 클 것으로 기대된다. 현재 본 연구실에서는 이에 대한 기초 연구를 이미 진행해 오고 있는데 그 연구 결과들을 아래에서 간략히 소개하겠다.

일반적으로 초광대역 레이저 광원을 만들기 위해서

는 펌프광 레이저의 발진 파장이 영분산 지점 근처에 위치하여야 한다[20]. 그림 3은 펌프광 레이저의 발진 특성에 따른 초광대역광 생성에 대한 수치해석 결과로 중심파장이 수광 광섬유의 영분산 지점 근처에 위치해 있으며, 펌프광 레이저 펄스의 폭은 90fs, 침투 출력 세기는 10kW로 산정되었다. 수광 광섬유는 실리카 기반 PCF로서 유효 코어 단면적 $\sim 3.8\mu\text{m}^2$, 비선형계수(γ)는 $\sim 37\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 로 산정되었다. 펌프광 레이저의 발진 특성에 따라 초광대역광 생성의 세부 특성은 다르지만, 공통적으로 그 발진 파장이 광섬유의 영분산 지점 근처에 위치할 경우 1.1 μm 파장대

역을 중심으로 한 초광대역광이 효율적으로 생성됨을 확인할 수 있다.

이러한 분산특성은 물질 자체가 가지는 고유한 물질 분산(Material dispersion) 특성과 더불어 광섬유의 기하 구조에 따른 도파로 분산(Waveguide dispersion) 특성에 의해 결정된다. 일반적인 실리카계열의 단일모드 광섬유의 경우 $1.3\mu\text{m}$ 근처에서 영분산을 갖지만, 비실리카계열 유리를 사용하는 경우 물질 분산특성이 다르기 때문에 광섬유의 기하 구조를 변화시켜 영분산 지점을 $1.3\mu\text{m}$ 대역으로 조절할 필요가 있다.

그림 4는 SF57의 물질 분산특성과 SF57에 어븀 이온을 혼입하여 W-형태 구조의 광섬유로 제작하였을 때 총 색분산 특성(물질 분산특성과 도파로 분산 특성의 합)을 나타내며, 이 결과는 도파로 구조에 따라 광섬유의 분산특성이 현격히 달라질 수 있음을 보여준다.

그림 5는 전술한 SF57 기반 모체에 추가적으로 란타늄계열의 어븀 이온을 혼입하여 W-형태 구조의 능동형 광섬유로 직접 제작한 후, 이를 초광대역광 생성을 위한 이득매질로 사용하였을 때의 실험 결과를 보여 준다. 이 때, 광섬유의 유효 코어 단면적은 $\sim 2.1\mu\text{m}^2$ 이며, 비선형계수(γ)는 $\sim 800\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 이다. 펌프광의 세기가 증가함에 따라 신호광(1550nm)의 세기가 순차적으로 증폭됨과 동시에 초광대역광이 생성되고 있음을 보여 준다. 또한, 기존의 실리카계열 광섬유에서와는 달리 1480nm 및 1620nm 파장대역에서의 4광자혼합(Four-wave mixing) 현상이 효과적으로 발생하고 있음을 보여 준다.

앞서 간략히 논의한 바와 같이, 1960년 T. Maiman이 최초로 루비 레이저를 개발한 이래로 광섬유 레이저 기술 또한 지난 수십여 년 동안 괄목할만한 발전을 거듭하고 있다. 그 결과, 다양한 종류의 광섬유 레이저들이 이미 과학기술 및 산업 현장에서 활발히 사용되고 있고, 그 응용 분야도 점차 확대되고

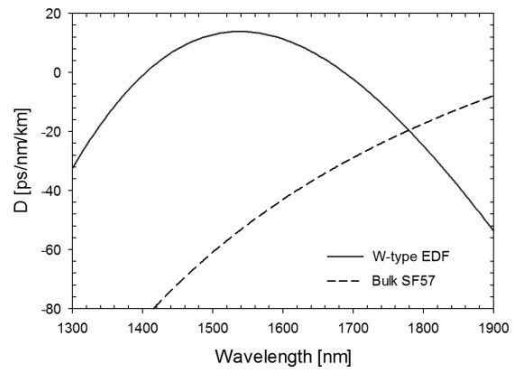


그림 4. W-형태 구조를 가진 어븀 혼입 SF57 광섬유의 총 색분산특성과 SF57 자체의 물질 분산특성(21)

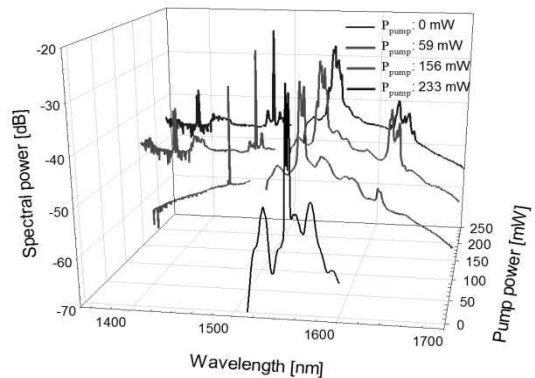


그림 5. W-형태 구조를 가진 어븀 혼입 SF57 광섬유에 피코초($\sim 11\text{ps}$) 펄스 입력을 통해 관찰된 초광대역광 생성 및 4광자혼합 현상(21)

있다. 광섬유 레이저의 출력 증대 관점에서 본다면, 단일 광섬유 레이저로부터 얻을 수 있는 최대 출력은 수 킬로와트 수준을 상회한다 할지라도, 궁극적으로는 광섬유 물질의 손상 임계값(통상적으로 $20\text{GW}/\text{cm}^2$)을 넘어 설 수는 없으므로, 레이저 고출력화의 최종 단계에서는 반드시 빔 조합(Beam combining)을 이용한 새로운 출력 증대 기술이 요구되므로, 이에 대한 연구 관심이 또한 고조될 것으로 예상된다(22). 또한, 일반적으로 광섬유 레이저의 발전 과정은 광섬유에 혼입되는 희토류 물질의 분광 특

성에 의존하게 되는데, 특별히 1200-1500nm 파장 대역에는 아직까지 고효율 특성을 갖는 레이저용 광섬유가 개발되지 않은 형편이다. 최근 Bi 혼입 광섬유의 분광 특성이 이에 부합하여 많은 연구가 되고 있으나[23-29], 고효율 특성을 얻기까지는 보다 많은 노력이 필요할 것으로 판단된다. 이 파장대역은 잠재적으로 생체 의용 영상 획득 분야에 응용될 수 있으므로, 이에 대한 지속적인 연구 관심이 기대된다[30]. 더 나아가서 광섬유 레이저의 발전 파장 다변화를 위한 비실리카계열 물질 기반 광섬유에 대한 연구 또한 앞으로 더욱 활발히 진행될 것으로 기대된다[31-32]. 본 서울대학교 레이저공학 및 응용 연구실(Laser Engineering and Applications Laboratory) 연구팀[33]은 2010년 9월부터 희토류 혼입 광섬유에 기반한 고출력/고에너지 레이저 개발, 극초단 레이저 개발, 비실리카계열 물질을 이용한 레이저용 광섬유 개발, 비선형 파장 변환, 빔 조합형 초고출력 광섬유 레이저 시스템 개발, 광섬유 기반 플라즈마 소자 개발, 근사 노이즈 발전형 초광대역 광원 개발, 광섬유 기반 초방사 양자 광증폭 기술 개발 등을 주요 연구 주제로 레이저와 관련된 다양한 연구들을 의욕적으로 수행하고 있다. 앞으로 광섬유 레이저 분야에 관심 있는 후학들과 관련 분야 연구자들과 더불어 국내 광섬유 레이저 개발 및 응용 연구를 더욱 발전시키고, 세계 레이저 분야 연구를 선도하는 한 축이 되기를 고대한다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne, and J. Nilsson, "Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous-wave output power," *Opt. Express*, vol. 12, no. 25, pp. 6088-6092, 2004.
- [2] Y. Jeong, J. K. Sahu, M. Laroche, W. A. Clarkson, K. Furusawa, D. J. Richardson, and J. Nilsson, "120-W Q-switched cladding-pumped Yb-doped fibre laser," *CLEO/Europe-EQEC 2003*, Munich, Jun. 23-27, 2003, paper C1.5-4.
- [3] Steven J. Augst, T. Y. Fan, and Antonio Sanchez, "Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 5, pp. 474-476, 2004.
- [4] E. Seise, A. Klenke, J. Limpert, and A. Tünnemann, "Coherent addition of fiber-amplified ultrashort laser pulses," *Opt. Express*, vol. 18, no. 26, pp. 27827-27835, 2010.
- [5] Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu, D. B. S. Soh, C. Alegria, P. Dupriez, C. A. Codemard, D. N. Payne, R. Horley, L. M. B. Hickey, L. Wanzyc, C. E. Chryssou, J. A. Alvarez-Chavez, and P. W. Turner, "Single-frequency, single-mode, plane-polarized ytterbium-doped fiber master-oscillator power amplifier source with 264W output power," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 5, pp. 459-461, 2005.
- [6] Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu, D. N. Payne, R. Horley, L. M. B. Hickey, and P. W. Turner, "Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier sources up to 500W," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 13, no. 3, pp. 546-551, 2007 (Invited).
- [7] A. Malinowski, K. T. Vu, K. K. Chen, J. Nilsson, Y. Jeong, S.-U. Alam, D. J. Lin, and D. J. Richardson, "High power pulsed fiber MOPA system incorporating electro-optic modulator based adaptive pulse shaping," *Opt. Express*, vol. 17, no. 23, pp. 20927-20937, 2009.
- [8] P. Dupriez, A. Piper, A. Malinowski, J. K. Sahu, M. Ibsen, B. C. Thomsen, Y. Jeong, L. M. B. Hickey, M. N. Zervas, J. Nilsson, and D. J. Richardson, "High average power, high repetition rate, picosecond pulsed fiber master oscillator - power amplifier source seeded by a gain-switched laser diode at 1060nm," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, no. 9, pp. 1013-1015, 2006.
- [9] F. G er me, P. Dupriez, J. Clowes, J. C. Knight, and W. J. Wadsworth, "High power tunable femtosecond soliton source using hollow-core photonic bandgap fiber, and its use for frequency doubling," *Opt. Express*, vol. 16, no. 4, pp. 2381-2386, 2008.
- [10] 정윤찬, "고출력 광섬유 레이저 기술과 그 응용," *광학과 기술* 17권 2호, 한국 광학회, pp. 4-10, 2013.
- [11] G.P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 2nd ed. Academic Press, Inc., 1995.
- [12] S.R. Friberg and P.W. Smith, "Nonlinear Optical-Glasses for Ultrafast Optical Switches," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 23, no. 12, pp. 2089-2094, 1987.
- [13] V.V.R.K. Kumar, A.K. George, W.H. Reeves, J.C. Knight, P.S. Russel, F.G. Omenetto, A.J. Taylor, "Extruded soft glass photonic crystal fibre for ultrabroad supercontinuum generation," *Opt. Express*, vol. 10, no. 25, pp. 1520-1525, 2002.
- [14] M. Asobe, "Nonlinear Optical Properties of Chalcogenide glass fibres and their application to all-optical switching," *Opt. Fibre Tech.*, vol. 3, no. 2, pp. 142-148, 1997.
- [15] J.S. Wang, E.M. Vogel, E. Snitzer, "Tellurite glass: a new candidate for fiber devices," *Opt. Mater.*, vol. 3, no. 3, pp. 187-203, 1994.
- [16] J. Requejo-Isidro, A.K. Mairaj, V. Pruneri, D.W. Hewak, M.C. Netti, and J.J. Baumberg, "Self refractive non-linearities in chalcogenide based glasses," *J. Non-Cryst.*, vol. 317, no. 3, pp. 241-246, 2003.
- [17] Monroe, Tanya M, and Heike Ebendorff-Heidepriem. "Progress in microstructured optical fibers." *Annu. Rev. Mater. Res.* vol. 36, pp. 467-495, 2006.
- [18] Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, "Infrared luminescence from bismuth-doped silica glass," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 40, no. 3B, pp. L279-L281, 2001.
- [19] Y. Jeong, "Prospects for efficient broadband optical amplification in the 1100-1500nm wavelength region," 2014

- IEEE Photonics Conference, San Diego, USA, 12-16 October, 2014, (Invited).
- [20] J. M. Dudley, "Supercontinuum generation in photonic crystal fiber," *Rev. of Mod. Phys.*, vol. 78, no. 4, pp. 1135-1184, 2006.
- [21] L. A. Vazquez-Zuniga, X. Feng, Y. Kwon, H. Kim, J. Shi, W. H. Loh, and Y. Jeong, "Continuum generation in a highly nonlinear soft-glass W-type index profiled Er-doped fiber," *ASSL* 2013, Paris, France, 27 Oct.-1 Nov., 2013, paper AM4A.22.
- [22] S. M. Redmond, D. J. Ripin, C. X. Yu, S. J. Augst, T. Y. Fan, P. A. Thielen, J. E. Rothenberg, and G. D. Goodno, "Diffractive coherent combining of a 2.5kW fiber laser array into a 1.9kW Gaussian beam," *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 14, pp. 2832-2834, 2012.
- [23] M. Peng, J. Qiu, D. Chen, X. Meng, I. Yang, X. Jiang, C. Zhu, "Bismuth- and aluminum-codoped germanium oxide glasses for super-broadband optical amplification," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 17, pp. 1998-2000, 2004.
- [24] M. Peng, X. Meng, J. Qiu, Q. Zhao, C. Zhu, "GeO₂ : Bi, M (M=Ga, B) glasses with super-wide infrared luminescence," *Chem. Phys. Lett.*, vol. 403, no. 4, pp. 410-414, 2005.
- [25] M. Peng, J. Qiu, D. Chen, X. Meng, C. Zhu, "Superbroadband 1310nm emission from bismuth and tantalum codoped germanium oxide glasses," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 18, pp. 2433-2435, 2005.
- [26] J. Ren, J. Qiu, B. Wu, D. Chen, "Ultrabroad infrared luminescence from Bi-doped alkaline earth metal germanate glasses," *J. Mater. Res.*, vol. 22, no. 06, pp. 1574-1578, 2007.
- [27] X. Meng, J. Qiu, M. Peng, D. Chen, Q. Zhao, X. Jiang, C. Zhu, "Near infrared broadband emission of bismuthdoped aluminophosphate glass," *Opt. Express*, vol. 13, no. 5, pp. 1628-1634, 2005.
- [28] T. Suzuki and Y. Ohishi, "Ultra-broadband near-infrared emission from Bi-doped Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ glass," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, no. 19, pp. 191912 (1-3), 2006.
- [29] B. Denker, B. Galagan, V. Osiko, S. Sverchkov, E. Dianov, "Luminescence properties of Bi-doped boro-alumino-phosphate glasses," *Appl. Phys. B*, vol. 87, no. 1, pp. 135-137, 2007.
- [30] L. A. Vazquez-Zuniga, H. Kim, Y. Kwon, and Y. Jeong, "Adaptive broadband continuum source at 1200-1400nm based on all-fiber dual-wavelength master-oscillator power amplifier and a high-birefringence fiber," *Opt. Express*, vol. 21, no. 6, pp. 7712-7725, 2013.
- [31] J. H. V. Price, X. Feng, A. M. Heidt, G. Brambilla, P. Horak, F. Poletti, G. Pozzo, P. Petropoulos, M. Petrovich, J. Shi, M. Ibsen, W. H. Loh, H. N. Rutt, and D. J. Richardson, "Supercontinuum generation in non-silica fibers," *Opt. Fiber Technol.* vol. 18, no. 5, pp. 327-344, 2012.
- [32] G. Sobon, M. Klimczak, J. Sotor, K. Krzempek, D. Pysz, R. Stepien, T. Martynkien, K. M. Abramski, and R. Buczynski, "Infrared supercontinuum generation in soft-glass photonic crystal fibers pumped at 1560nm," *Opt. Mater. Express*, vol. 4, no. 1, pp. 7-15, 2014.
- [33] Information available from <http://leal.snu.ac.kr>.

◇ 저자 소개 ◇



정윤찬(Yoonchan Jeong)

1990~1999년 서울대학교 전기공학부 박사/석사/학사. 1999~2001년 서울대학교 전기공학부/반도체공동연구소 박사후연구원. 2001~2010년 Reader /SnrRF/RF, Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, United Kingdom. 2010년~현재 서울대학교 전기·정보공학부 부교수/조교수. 2008~2013년 Program committee, Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications, LASE, Photonics West (SPIE). 2009년~현재 Associate Editor, Optics Express, Optical Society of America. 2010년~현재 Program committee, Advanced Solid-State Lasers/Photonics, Optical Society of America. 2013년~현재 Steering committee, Siegman International School on Lasers. 2015년~현재 Visiting Scholar, Centre for Photonics and Electronics, University of Cambridge, United Kingdom. 2016 David Richardson Medal Committee, Optical Society of America. Subcommittee chair, Laser Based Sensors, Optical Sensors, Advanced Photonics, Optical Society of America.



김진섭(Jinseob Kim)

2006~2011년 서울대학교 전기공학부 졸업. 2011~2013년 서울대학교 전기공학부 졸업(석사). 2013년~현재 서울대학교 전기공학부 박사과정.



권영철(Youngchul Kwon)

2004~2011년 서울대학교 전기공학부 졸업. 2011년~현재 서울대학교 전기공학부 석박 통합과정.