

**『4단계 BK21사업』 미래인재 양성사업(과학기술 분야)**  
**교육연구팀 자체평가보고서**

접수번호	4299990114491							
사업 분야	기초과학(팀)	신청분야	물리	단위	전국	구분	교육연구팀	
학술연구분야 분류코드	구분	관련분야		관련분야		관련분야		
		중분류	소분류	중분류	소분류	중분류	소분류	
	분류명	물리학	응집물질물리	물리학	고체물리	물리학	광학 및 양자전기학	
	비중(%)	40		40		20		
교육연구 팀명	국문) 양자물질 극한물성 교육연구팀							
	영문) Studies of Quantum Materials at Extreme Conditions							
교육연구 팀장	소 속	한양대학교 자연과학대학 물리학과						
	직 위	교 수						
	성명	국문	김 재 용	전화	02-2220-0917			
				팩스	02-2220-0319			
		영문	Kim, Jaeyong	이동전화				
E-mail				kimjy@hanyang.ac.kr				
연차별 총 사업비 (백만원)	구분	1차년도 (20.9~21.2)	2차년도 (21.3~22.2)					
	국고지원금	160	321					
총 사업기간	2020.9.1. - 2027.8.31.(84개월)							
자체평가 대상기간	2020.9.1. - 2021.8.31.(12개월)							
<p>본인은 관련 규정에 따라, 『4단계 BK21』사업 관련 법령, 귀 재단과의 협약에 따라 다음과 같이 자체평가보고서 및 자체평가결과보고서를 제출합니다.</p> <p style="text-align: right;">2021년 9월 13일</p>								
작성자	교육연구팀장			김 재 용 (인)				
확인자	한양대학교 산학협력단장			하 성 규 (인)				

## 〈자체평가 보고서 요약문〉

중심어	양자물질	극한물성	온도압력
	양자특이점	초전도성	슈퍼물성
	창의적 인재	실용물리	융합적사고
<b>교육연구팀의 비전과 목표 달성정도</b>	극한물성분야의 창의적 연구인재 양성을 비전으로 하는 본 교육연구팀은 양자물질의 시간·공간·환경 물리변수기반 극한물성 탐구에 필요한 창의적 연구인력 양성을 목표로 교육, 연구, 국제화분야에서 지난 1년 동안 노력하였던 바, 대학원생의 연구력 강화, 대학원 교육개편 실행, 그리고 코로나-19 상황에서도 국제화 유지 등이 계획에 따라 잘 진행되고 있음. 교육과 연구 영역별 성과내용은 다음과 같음.		
<b>교육역량 영역 성과</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 교과목 개설 및 운영현황 <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 본 사업내용에 맞추어 대학원교과 과정을 기초, 핵심, 심화, 특성화, 그리고 공통과목으로 분류하고 10과목 (25학점) 개설/운영</li> </ul> </li> <li>2. 본 사업 참여대학원생 수 증가 <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 참여대학원생 33명 (학과대비 참여비율 46%, 사업 신청시 대비 4명 증가)</li> <li>▪ 대학원생 졸업: 3명 학위취득</li> </ul> </li> <li>3. 신진연구인력 임용: 본교 대학원 출신 박사학위자를 신진연구인력으로 임용</li> </ol>		
<b>연구역량 영역 성과</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 대학원생 연구 <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 지난 1년 동안 대학원생 논문 출간 18편, (IF &gt; 5.0 논문 수: 5편)</li> <li>▪ 대표논문: 2차원 층상 전자화물에서 Weyl 반금속 발견 - Physical Review Letters (유서원, 제 1 저자)</li> </ul> </li> <li>2. 참여교수 연구력 <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 우수신임교원 1명 충원, 내부교수 1명 추가 영입</li> <li>▪ 논문 55편 출간 (IF &gt; 5.0 논문 수: 31편)</li> <li>▪ 연구비: 총 37.2억원 수주 (1인당 4.13억원)</li> </ul> </li> </ol>		
<b>달성 성과 요약</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 교육: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 극한물성관련 신규과목 개설을 통한 대학원교육 특성화 시도</li> <li>▪ 참여대학원생 BK 연구성과 발표회 매학기 시행</li> <li>▪ 참여대학원생 우수논문 선정 및 성과급 지급</li> </ul> </li> <li>2. 연구: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 대학원생 연구력 증가</li> <li>▪ 참여교수 연구논문, 연구비 지속적 증가</li> <li>▪ BK세미나 시리즈를 개설하여 매주 세계적 전문가 초빙을 통한 최신 연구결과 습득</li> </ul> </li> <li>3. 국제화: MoU 추가 체결, 온라인과 방문교류를 통한 국제교류 유지</li> </ol>		
<b>미흡한 부분 / 문제점 제시</b>	본 교육연구팀이 목표로 하고 있는 중국, 미국, 유럽, 그리고 동남아시아권 우수기관들과의 국제교류사업이 코로나사태로 인해 직접 방문을 통한 교류가 거의 불가능 하였고, 이러한 상황이 1단계 기간 동안 특별히 호전될 것 같지 않은 상황에서, 방문교류 대신 온라인 방식을 통해 국제화를 추진할 수 있는 방안을 수립할 필요가 있음.		
<b>차년도 추진계획</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 대학원교육: 계획서에서 제시한대로 대학원 교과 과정을 기초, 핵심, 심화, 특성화, 그리고 공통과목으로 운영</li> <li>2. 연구: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 대학원생: 현 추세대로 지속적인 연구력 증가</li> <li>▪ 참여교수: 우수교원 확충을 위한 노력 지속</li> </ul> </li> <li>3. 국제화: 코로나 사태관련 세계적 상황이 호전될 때까지 온라인을 통한 국제화 교육, 연구 기조 유지</li> </ol>		

## 1. 교육연구팀장의 교육·연구·행정 역량

성 명	한 글	김 재 용	영 문	Kim, Jaeyong
소 속 기 관	한양대학교 자연과학대학 물리학과			

교육연구팀장인 김재용 교수는 Washington University in St. Louis에서 준결정체의 구조와 수소저장을 주제로 박사학위를 취득한 후 Brookhaven National Laboratory에서 박사후 연구원과 포항가속기 선임연구원을 거쳐 2005년 3월 본교에 부임하였습니다. 이후, 물리학과장, 나노융합학과장, 한양대부설 고압연구소장 등 교육-연구 관련 다양한 보직을 수행하였고, 130 여 편의 SCI 논문을 출간하였습니다. 최근 다이아몬드 앤빌셀을 활용한 백만기압 단위 초고압 관련 국내 연구를 선도하고 있다고 평가 받고 있습니다.

## 1 교육연구팀장의 연구 역량

비주기적 결정체의 형성과 응용에 관한 연구분야에서 김재용교수는 1990년 ‘준결정체’가 보이는 준주기성 개념을 국내에 도입하였으며 준안정상태의 구조 및 물성분석, 그리고 이를 응용한 수소에너지 저장연구를 수행해오고 있습니다. 최근에는 중국 북경고압연구소(HPSTAR, Center for High Pressure Science and Technology for Advanced Research)와 미국 카네기연구소(CIS, Carnegie Institution for Science)를 한양대학교에 유치하여 국내에서 다이아몬드 앤빌셀을 이용한 초고압 연구분야를 선도하였습니다. 본 연구를 시작으로 국내에서도 수십 GPa 초고압상태의 물성을 분석할 수 있게 되었고, 레이저 가열법을 연계하여 섭씨 수천 도에 이르는 초고압-초고온 상태의 물성을 실시간으로 분석하는 등, 소위 압력-온도를 매개로 하는 ‘극한환경’ 연구를 국내에 도입함. 2019년 8월 한양대학교부설 고압연구소를 설립하여 압력 전반에 관한 연구 및 국내외 네트워크를 구축하고 있음. 세계우수연구기관유치사업(GRDC, Global Research Development Center) 협의회장 역임, 제 10회 아시아고압 학회를 세계고압반도체학회, 세계고압초전도학회와 함께 유치하여 2021년 11월 한국의 극한환경 연구현황을 세계에 소개할 예정입니다.

## 2 교육연구팀장의 교육 및 행정 역량

본 교육연구팀장은 학과 실험주임(2007.03-2008.08), 물리학과장(2008.09-2010.02), 나노융합학과장(2013.09 ~ 2016.08), GRDC-2019 협회장, 한양대-HPSTAR-CIS 고압연구소장(2016.08~현재), 한양대부설 고압연구소장(2019.08.01~현재) 등 다양하고 전문적인 교육-행정 경험을 갖추고 있음. 특히 물리학과 실험주임 시절에는 일반 물리학, 일반역학, 그리고 전자기학과 현대물리학 실험실장비와 교육 시설을 대폭 개선하여 본 학과 현대물리학 실험실이 대학교육협의회주관 학과평가에서 모범 교육 실험실로 선정되도록 노력하였고(2009), 물리학과장시절에는 장학기금, 교육전담교원채용 등 학과의 학사와 행정제도를 개편하였습니다. 특히 학부-대학원 연계 연구논문발표회(봄), 학과체육회(가을), 그리고 학부생 졸업여행(1월)을 실시하여 학생-교수간 원활한 채널을 구성하고자 노력하였습니다. 일반인과 학생들을 대상으로 ‘금요일에과학터치’ 프로그램을 부산(2017.06)과 광주(2018.10)에서 진행하여 과학대중화 및 고압관련 연구를 국내에 보급하는데 일조함. 나노융합학과장 기간 동안 공과대학 교육 과정에 자연과학대학 과목들을 개설하여 자연과학과 공학이 연계된 교과과정을 수립하는 등 학제간 융합교육을 시도하였습니다. 이렇듯 다양하고 지속적인 교내외 교육과 행정 경험은 본 교육연구팀을 성공적으로 이끌어 갈 수 있는 원동력이라고 확신함.

## 3 교육연구팀장의 수행의지

교수의 역할은 연구와 교육을 동시에 수행하여 다음 세대에게 자신이 쌓아온 지식과 경험을 전해 주는 것이라고 생각함. 그런 면에서 BK 사업을 성공적으로 운영하는 것은 교수로서 가장 의미있고 보람있는 경험이 될 것으로 확신함. 이러한 신념으로 김재용 교수는 지금까지 쌓아온 연구-교육-행정 경험과 능력을 바탕으로 본 교육연구팀이 ‘양자물질 극한물성’ 분야에서 우수한 신진 연구인력을 양성하고 세계적인 연구결과를 도출하여 극한물성 연구를 선도하는 연구와 교육의 메카가 될 수 있도록 교육자의 소명감을 가지고 최선을 다하고 있음.

## 2. 대학원 학과(부) 소속 전체 교수 및 참여연구진

<표 1-1> 교육연구팀 대학원 학과(부) 전임교수 현황

(단위: 명, %)

대학원 학과(부)	학기	전체교수 수	참여교수 수	참여비율(%)	비고
물리학과	2020년 2학기	20명	7명	35%	
	2021년 1학기	21명	9명	42.8%	

<표 1-2> 최근 1년간(2020.9.1.~2021.8.31.) 교육연구팀 대학원 학과(부) 소속 전임교수 변동내역

연번	성명	변동 학기	전출/전입	변동 사유	비고
1	정문석	2021년 1학기	전입	신규 임용	

<표 1-3> 교육연구팀 대학원 학과(부) 대학원생 현황

(단위: 명, %)

대학원 학과(부)	참여 인력 구성	대학원생 수											
		석사			박사			석·박사 통합			계		
		전체	참여	참여 비율 (%)	전체	참여	참여 비율 (%)	전체	참여	참여 비율 (%)	전체	참여	참여 비율 (%)
물리학과	2020년 2학기	11	8	72.7%	12	4	33.3%	40	15	37.5%	63	27	42.8%
	2021년 1학기	16	11	68.7%	13	4	30.7%	42	18	42.8%	71	33	46.4%
참여교수 대 참여학생 비율					2020년 2학기:3.86					2021년 1학기:3.67			

- 신입교원 충원
  - 정문석 교수: 2021년 3월에 응집물질 물성 분야의 전문가인 정문석 교수를 한양대학교 물리학과에 영입하였음. 정문석 교수는 나노물질 합성, 소자 제작, 특성 평가 분야에서 세계적으로 선두 연구를 수행하고 있음. 특히, 물질의 광학적 특성을 나노미터 스케일에서 측정할 수 있는 tip-enhanced Raman 분광 장비 제작 및 운영에 대한 전문성을 가지고 있음. 이 장비는 기존의 분광법에서는 접근이 불가능한 나노미터 스케일의 물리 현상을 직접적으로 측정할 수 있어 응집물질의 저차원 특성을 연구하는데 중요한 역할을 할 수 있음.
- 신규 참여교수 영입
  - 천상모 교수: 응집물질 분야 이론물리학자로서, 위상 물질, 위상 초전도 현상, 솔리톤 등에 대한 연구를 수행하고 있음. 천상모 교수는 응집물질 분야뿐만 아니라, 입자물리, 광과학 분야에서도 뛰어난 업적을 발표한 바 있음. 천상모 교수의 영입을 통해, 본 교육연구팀 참여교수들이 이론과 실험이 연계된 공동연구를 더 활발히 수행할 수 있을 것임.

## 2. 교육연구팀의 비전 및 목표 달성정도

### ❖ 교육연구팀의 비전 및 목표

본 교육연구팀의 비전은 극한물성분야의 창의적 연구인재 양성으로, 다음과 같이 교육, 연구, 국제화 영역의 목표를 설정하고 지난 1년간 운영하고 있음.

- 교육: 물리학의 한계에 도전하는 문제해결 능력과 융합적 사고를 갖춘 후속 인재 양성
- 연구: 극한 물리환경에서 시공간 비대칭성과 초전도를 포함한 양자특이성 연구
- 국제화: 양자물질의 극한물성 연구분야 국제허브 구축



[양자물질 극한물성 교육연구팀의 비전 개념도]

### ❖ 교육

#### 📖 교육과정

본 교육연구팀의 교육목표에 맞추어, 대학원 교과과정을 기초, 핵심, 심화, 특성화, 그리고 공통과목으로 개편하고, 1차년도에는 아래 <표 1-4>와 같이 10과목, 25학점을 운영하였음.

<표 1-4> 1차년도 운영 교과목

	기초	핵심	심화	특성화	공통과목
1차년도 운영 교과목	2과목 (6학점)	1과목 (3학점)	4과목 (12학점)	1과목 (3학점)	1과목 (1학점)

#### 📖 BK 세미나 운영

매주 BK 세미나를 열고 전문가들을 초청하여, 대학원생이 최신 연구 동향을 습득할 수 있도록 하였음. 2020년 10월 15일부터 2021년 8월 27일까지 총 47회 실시함 (세부내용 19쪽 표<2-10> 참조).



[대면 및 비대면 BK 세미나 운영 (코로나 방역 지침 준수함)]

## BK 성과발표회

매년 2회(1월, 7월)의 BK 성과발표회를 통해서 대학원생들의 연구 성과를 공유함. 우수 연구를 수행한 대학원생에게 최우수상, 우수상, 장려상을 수여하고 장학금을 지급하였음.

**양자물성 극한물성 교육연구팀 1차년도 성과 발표회**

2020 BKFOUR 양자물성 극한물성 교육연구팀 1차년도 성과 발표회

2021년 1월 28일(목)  
14:00 - 16:00  
자연과학관 123호 회의실 & 온라인 중계

시간	발표자	제목
14:00-14:05	개회식	양자물성 극한물성 교육연구팀
14:05-14:10	김민준	Strong and temperature evolution of optical response of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$
14:10-14:15	김민준	$\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ heterostructure exhibits high spin under extreme conditions
14:15-14:20	김민준	Microscopic characterization of a topological $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ heterostructure through Fourier transform spectroscopy
14:20-14:25	김민준	Fast optical detection using quantum phase
14:25-14:30	김민준	Structure of the topological crystal and the charge transfer near the quantum critical point
14:30-14:35	김민준	Photorefractive properties in two-dimensional layered structure $\text{Bi}_2\text{Te}_3$
14:35-14:40	김민준	Protonic switching between normal and topological states in $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ thin films
14:40-14:45	김민준	Structural Anisotropy, Quality, and Heterogeneity of Topological Crystalline Layers
14:45-14:50	김민준	Structural Anisotropy, Quality, and Heterogeneity of Topological Crystalline Layers
14:50-14:55	김민준	Structural Anisotropy, Quality, and Heterogeneity of Topological Crystalline Layers
14:55-15:00	김민준	Structural Anisotropy, Quality, and Heterogeneity of Topological Crystalline Layers
15:00-15:05	김민준	Structural Anisotropy, Quality, and Heterogeneity of Topological Crystalline Layers
15:05-15:10	김민준	Structural Anisotropy, Quality, and Heterogeneity of Topological Crystalline Layers
15:10-15:15	김민준	Structural Anisotropy, Quality, and Heterogeneity of Topological Crystalline Layers
15:15-15:20	김민준	Structural Anisotropy, Quality, and Heterogeneity of Topological Crystalline Layers
15:20-15:25	김민준	Structural Anisotropy, Quality, and Heterogeneity of Topological Crystalline Layers
15:25-15:30	김민준	Structural Anisotropy, Quality, and Heterogeneity of Topological Crystalline Layers
15:30-15:35	김민준	Structural Anisotropy, Quality, and Heterogeneity of Topological Crystalline Layers
15:35-15:40	김민준	Structural Anisotropy, Quality, and Heterogeneity of Topological Crystalline Layers
15:40-15:45	김민준	Structural Anisotropy, Quality, and Heterogeneity of Topological Crystalline Layers
15:45-15:50	김민준	Structural Anisotropy, Quality, and Heterogeneity of Topological Crystalline Layers
15:50-15:55	김민준	Structural Anisotropy, Quality, and Heterogeneity of Topological Crystalline Layers
15:55-16:00	김민준	Structural Anisotropy, Quality, and Heterogeneity of Topological Crystalline Layers

**양자물성 극한물성 교육연구팀 2차년도 성과 발표회**

2021-1 BKFOUR 양자물성 극한물성 교육연구팀 2차년도 성과 발표회

2021년 7월 30일(금) 14:00  
온라인 중계(ZOOM)  
회의 ID : 834 6350 2050  
회의 암호 : 211807

시간	발표자	제목
14:00-14:05	개회식	양자물성 극한물성 교육연구팀
14:05-14:10	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
14:10-14:15	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
14:15-14:20	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
14:20-14:25	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
14:25-14:30	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
14:30-14:35	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
14:35-14:40	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
14:40-14:45	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
14:45-14:50	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
14:50-14:55	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
14:55-15:00	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
15:00-15:05	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
15:05-15:10	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
15:10-15:15	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
15:15-15:20	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
15:20-15:25	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
15:25-15:30	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
15:30-15:35	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
15:35-15:40	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
15:40-15:45	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
15:45-15:50	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
15:50-15:55	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure
15:55-16:00	김민준	Structure and Surface Study of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Heterostructure

[2021년 1월 28일, 2021년 7월 20일 1차년도 및 2차년도 성과 발표회]



[2021년 1월 28일, 2021년 7월 20일 장학금수여식]

## 대학원생 연구 성과

- IF  $\geq$  Phys. Rev. Lett. 논문 수 3편
- 환산보정 IF 합 3.59: 1단계 (3년) 목표치의 1/3 달성. 2017 - 19 대비 8% 증가
- 환산보정 ES 합 16.00: 1단계 (3년) 목표치의 2/3 달성. 2017 - 19 대비 126% 증가
- 1차년도 참여대학원생 논문 18편: 2017 -19 연평균 (15.7편) 대비 14% 증가

- BK 선정 평가 시 제시한 1단계 참여대학원생 연구실적 목표

- IF  $\geq$  Phys. Rev. Lett. 논문 수 6편
- 환산보정 IF 합 매년 10% 증가
- 환산보정 ES 합 매년 10% 증가

<표 1-5> 1차년도 참여대학원생의 연구실적

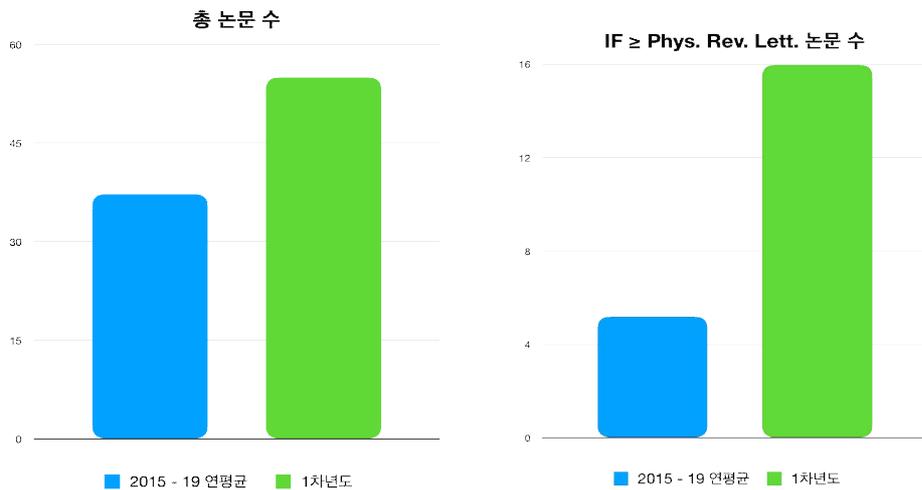
	1차년도	2017-19 연평균	1단계 목표 (3년) (2020.9-2022.9)
IF $\geq$ Phys. Rev. Lett. 논문 수	3	1.67	6
환산보정 IF 합	3.59	3.31	10.92
환산보정 ES 합	16.00	7.09	23.40

❖ 참여교수 연구성과

- 🎨 1차년도 참여교수들의 발표논문 55편, IF 합 485.626
- 🎨 IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수 16
- 🎨 IF > 10.0 논문수: 14편 (25.5%), IF > 5.0 논문 수: 31 (56.4%), IF > 3.0 논문 수: 48 (87.3%)

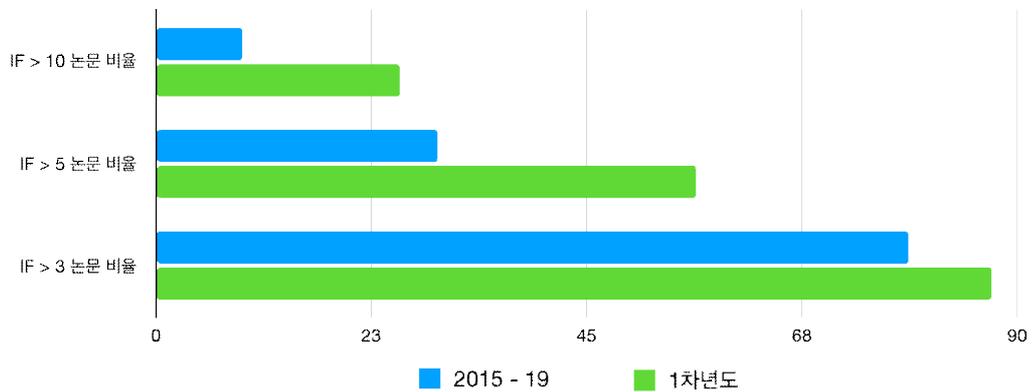
• 1차년도 논문 수

- 총 논문 수: 2015 - 2019년 논문 수 연평균 (37편) 대비 **48% 증가**
- IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수: 2015 - 19 연평균 대비 **207% 증가**



• 우수 논문 비율

- IF > 10 논문 비율: 2015 - 2019년 대비 **183% 증가**
- IF > 5 논문 비율: 2015 - 2019년 대비 **92% 증가**
- IF > 3 논문 비율: 2015 - 2019년 대비 **11% 증가**
- IF < 3 논문 비율: 2015 - 2019년 대비 **41% 감소**



• 1차년도 연구성과 세부지표

<표 1-6> 1차년도 참여교수 연구실적

	1차년도	2015-19 연평균	증감 (%)	1단계 목표(~ 2023)
IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수	16	5.2	+207	28
IF > 5 논문 비율 (%)	56	29	+93	35
환산보정 IF 합	8.35	5.31	+57	17.52
환산보정 ES 합	21.57	20.05	+7	66.17

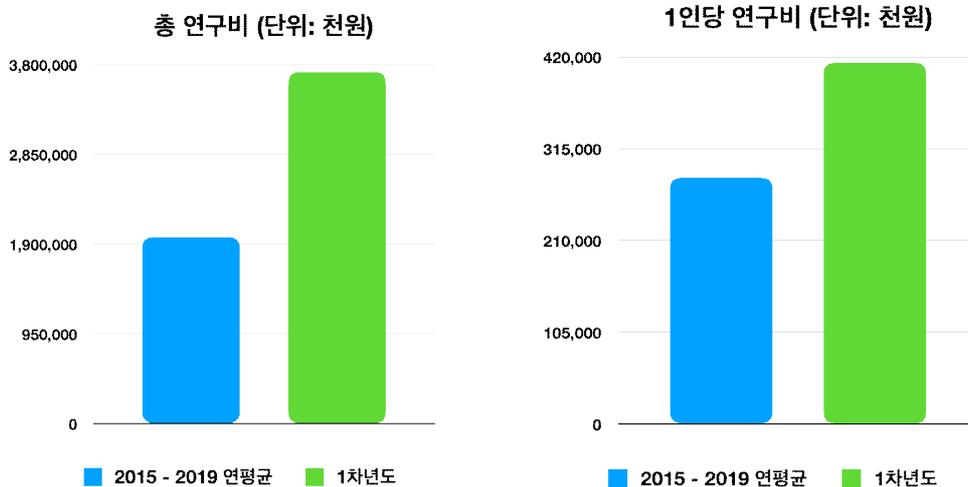
- IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수: 2015 - 2019 연평균 대비 2.88배, 1단계 목표치의 53.6% 달성.
- IF ≥ 5인 논문의 비율 59%: 2015 - 19 대비 약 2배 달성, 현 상태를 유지한다면 목표를 초과 달성할 것으로 예상.
- 환산보정 IF 합: 1단계 목표치의 48% 달성, 현 상태를 유지한다면 목표를 초과 달성할 것으로 예상.
- 환산보정 ES 합: 1단계 목표치의 33% 달성, 현 상태를 유지한다면 목표를 초과 달성할 것으로 예상.

• 연구비

<표 1-7> 1차년도 참여교수의 연구비 수주 실적

	1차년도	2015-19 연평균
연구비 총액 (천원)	3,721,926	1,970,844
1인당 연구비 (천원)	413,547	281,549

- 1차년도 연구비 총액 3,721,926,267원, 참여교수 1인당 연구비 413,547,363원
- 2017-2019년 연평균 연구비 대비 연구비 총액 82% 증가, 1인당 연구비 총액 42% 증가
- 해외 연구비 수주: 미국 공군 (Asian Office of Aerospace Research and Development)



## ❖ 국제화

### 📖 참여대학원생 국제공동연구 성과

- 학회발표: 국제학술대회 3건, 국내학술대회 4건, 학회수상 실적 3건
- 연구인력 파견: 박사과정생은 중국 Yanshan University의 교수 연구실을 28일 동안 방문하여 다이아몬드 앤빌셀을 이용한 C60 m-xylene의 초고압에서의 물성연구 수행

### 📖 참여교수의 국제 학술활동 실적

- 참여교수 국제학술대회 위원장 및 조직위원 활동 (세부내용 59쪽 참조)
- 김재용 교수, 문순재 교수, 정문석 교수, 조준형 교수는 미국, 중국, 폴란드, 유럽등과의 공동연구결과 논문 13편 출간
- 양자물성 고압물성관련 전문심포지엄 개최: The 1<sup>st</sup> Workshop on Quantum Material under Extreme Conditions (2020. 11. 27.)
- 국제학술대회 유치: 제10회 아시아고압학회를 제 19회 세계고압초전도학회, 제3회 고압반도체학회와 공동 개최. 일시: 2021.11.21.-25 (<http://achpr10.org>)

### 📖 국제공동연구네트워크 추진 성과

- 해외우수학자 학과 겸임교수 활용: 중국 HPSTAR 소속 교수, 교수, 교수, Yanshan University 소속 교수 등을 본교 특임교수, 겸임교수로 각각 발령하여 대학원생 논문, 연구활동 지도 수행
- 제안서 제출 시 6건 외 MoU 1건 신규 체결 (중국 Yanshan University, School of Science, 2021.01.04.)  
내용: 학생 및 연구원교류, 국제공동연구, 공동심포지엄 개최

<p style="text-align: center;"><b>Memorandum of Understanding</b> Between School of Science, Yanshan University, Qinhuangdao, P.R. China and Department of Physics, Hanyang University, Seoul, Korea</p> <p>This Memorandum of Understanding (hereinafter referred to as "MoU") is made between the School of Science at Yanshan University, having its principal address at No. 438 West Hebei Avenue, Qinhuangdao, Hebei Province, 066004, P.R.China, and Physics Department of Hanyang University, having its principal address at 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, 04467, Republic of Korea; and collectively hereinafter referred to as "Parties" and individually as the "Party".</p> <p>This MoU is intended to form the foundation for further exchanges between the Parties and is not intended to create legally binding obligations of either Party. The specific terms of cooperation for each activity under this MoU shall be annually discussed and agreed upon in the future, should the need arise, and shall be subject to appropriate and separate agreements, in conformity with the policies, guidelines and processes in place.</p> <p>The Parties therefore wish to state the following:</p> <p><b>Common Objectives and Vision</b></p> <p>The Parties agree to promote excellence through multidisciplinary and multi-institutional collaborations in order to build a partnership consistent with the strategic goals and values of both institutions. The present MoU aims to explore in further details the establishment of research cooperation between School of Science at Yanshan University, and Department of Physics at Hanyang University in conducting research and coordinating academic discussions on forefront research topics of high pressure physics.</p> <p><b>Understanding</b></p> <p>The Parties agree that the means for achieving the objectives of this MoU include, but are not limited to:</p>	<p><b>1. Mobility of professors and research personnel</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Exchange scientific and technical information including delivering lectures and holding joint seminars and symposia;</li> <li>- Invite researchers from both institutions for short or longer stays or sabbaticals in our respective laboratories to develop collaborative projects or to be trained in specialized techniques; and</li> <li>- Develop an exchange program for staff, doctoral students and post doctoral fellows between the two Parties. Such exchange programs shall be the subject of a separate agreement.</li> </ul> <p><b>2. Application of external research funding</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Encourage scientists to develop joint research projects and make applications to national and international funding agencies supporting work in areas of mutual interest; and</li> <li>- Explore other opportunities for alliances between the two Parties.</li> </ul> <p><b>3. Production and dissemination of knowledge</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilitate the application, exchange and general dissemination of research results;</li> <li>- Participate in seminars and academic meetings, subject to financing from an internal source or an external granting agency; and</li> <li>- Promote international research experience/training for graduate students, post doctoral fellows and staff within each other's institutions. Part of such program could be extended to the co-supervision of trainees associated to a joint research project, with prior approval from the Parties.</li> </ul> <p><b>Intellectual Property</b></p> <p>The MoU imposes no binding obligation on either Party (financial or otherwise) joint activities that require funding (e.g. travel and housing costs, laboratory material and supplies) should not be initiated before the necessary resources have been secured.</p> <p>Each Party agrees not to use the other's name or logo in publicity without written consent from the senior executive of the other Party or his/her designate. The Intellectual Property policies in place at each institution shall apply to the activities initiated and implemented by the respective researchers.</p> <p><b>Publication</b></p> <p>The Parties shall jointly publish the results.</p>	<p><b>Term and Validity</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• This MoU shall become effective from the date of its signing and shall remain in force for a period of five (5) years. The Parties further agree that any dispute between the Parties will be settled as amicably as possible.</li> <li>• This MoU is established in two copies and is executed in English.</li> </ul> <p>The parties have signified their acceptance of this MoU herein by signing below and each will retain one duplicate text of equal authenticity.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">               Owingang Lee, Ph. D.              Professor and Chairperson              Department of Physics              Hanyang University, Seoul, ROK              Date: Dec. 24, 2020         </div> <div style="text-align: center;">               Yang Jia, D.              Professor and Director              School of Science              Yanshan University, Qinhuangdao, China              Date: Jan. 4th         </div> </div>
---	--	---

## [Yanshan 대학교 이과대학과 한양대학교 물리학과 MoU]

- MoU 기반 해외우수인력 유치:
  - 중국 Yanshan 대학교 물리학과 박사과정생은 2021.09.03.부터 김재용 교수 연구실에서 수소화물 초전도체관련 공동연구를 시작함.
  - 중국 길림대학교 물리학과 소속 박사를 2021.10.01.부터 본 교육연구팀 신진연구인력으로 활용하여 두 기관의 국제공동연구의 가교역할을 수행하기로 함.

## ❖ 교육연구팀 구성



교육연구팀 구성 체계 완성 및 운영

- 주기적으로 모든 참여교수가 참가하는 회의를 통해서 본 교육연구팀의 주요 안건을 의결하고 회의록을 작성함.
- 운영위원회 구성  
본 교육팀 참여교수 4인(김재용 교수, 문순재 교수, 정문석 교수, 천상모 교수)을 구성하여 운영함.
- (외부) 자문위원회 구성  
비참여교수(            교수,            교수)를 위촉하여 자문과 감사를 수행함.
- 교육위원회 구성  
본 교육팀 참여교수 5인(김재용 교수, 문순재 교수, 정문석 교수, 신상진 교수, 천상모 교수)을 구성함.



[교육연구팀의 구성]



교육연구팀 홈페이지 완성 운영



[교육연구팀 홈페이지. <https://phybk.hanyang.ac.kr>]

## ❖ 신청서에 작성된 저명대학 벤치마킹 대상과의 비교 분석

본 교육 연구팀은 교육과 연구 관점에서 미국 라이스(Rice) 대학과 중국 길림(Jilin) 대학을 벤치마킹 대상으로 선정하였고 비교 분석을 통해 수립한 목표를 지난 1년간 아래와 같이 점검함.

- 2021.3월 외부에서 영입한 전임교원(정문석교수)을 본 교육 연구팀에 합류시켜 교육과 연구분야의 목표를 적극적으로 달성할 수 있도록 하였음.
- 교육 프로그램을 기초, 핵심, 심화, 특성화로 나누어 구성하고, 물리학의 한계에 도전하는 문제해결 능력과 융합적 사고를 갖춘 후속 인재를 양성할 수 있도록 하였음. (교육위원회에서 의결. 표<1-8> 참조.)
- 석박사(박사포함)과정생의 예비시험, 종합시험 규정을 강화하고, 박사과정생의 경우 졸업에 필요한 요건을 제1저자로 출간한 SCI급 논문 IF 합 6이상, 해외 학회 구두 발표를 1회 이상으로 강화하였음. (내규 규정.)
- 현장실습중심의 강의를 강화하기 위해서 IC-PBL수업을 교과목 개발을 의결하고, 2021년 2학기 대학원 교육과정부터 새로운 IC-PBL수업을 추가하였음. (교육위원회에서 의결.)

<표 1-8> 2020-21 교육실적과 교과과정 편성표

구분	2020년 2학기	2021년 1학기	2021년 2학기	2022년 1학기	2022년 2학기
기초과목	통계역학	양자물리학	전자기학	역학	통계역학
핵심과목	고체물리학2			고체물리학1	고체물리학2
심화과목	다체계및위상물리	위상물리2	위상광자학	다체계1	다체계2
	반도체소재및물성	강상관계1	저차원반도체 물성연구	강상관양자 물질분광학	
			초끈이론과 강상관계		
특성화과목		광학실험실습		광학설계실습	
IC-PBL 과목			극한물성분석		초고압상변이와 수송현상
			양자물질 전자구조계산		저항변화메모리와 스핀트로닉스
공통과목	첨단물리특론	첨단물리특론	첨단물리특론	첨단물리특론	첨단물리특론

❖ 교육연구팀의 비전 및 목표 달성을 위한 애로사항 등 기술

- 본 교육연구팀은 코로나-19 상황에도 불구하고 교육/연구/국제화 분야에서 제안서에 기반하여 지속적으로 활동을 하고 있음.
- 온라인을 통한 국제공동연구를 진행하고 있으며, 해외연사를 온라인으로 초청하여 BK 워크샵을 진행하였음.
- 코로나 상황이 완화되면, 극한물성분야의 전문가 초청, 국제공동연구 활성화, 국제여름학교 개최 등 본 교육연구팀의 목표인 극한물성분야에서 국제 허브가 되도록 프로그램을 진행해나갈 계획임.
- 또한, 코로나가 지속되더라도 온라인과 개인 네트워크를 활용하여 지속적으로 코로나의 어려운 상황을 타개해나갈 계획임.

## II

## 교육역량 영역

### □ 교육역량 대표 우수성과

#### ❖ 대학원생 연구 실적

<표 2-1> 1차년도 참여대학원생의 연구실적

	1차년도	2017-19 연평균	1단계 목표 (3년) (2020.9-2022.9)
IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수	3	1.67	6
환산보정 IF 합	3.59	3.31	10.92
환산보정 ES 합	16.00	7.09	23.40

- 🍎 IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수 3편
- 🍎 환산보정 IF 합 3.59: 1단계 (3년) 목표치의 1/3 달성. 2017 - 19 대비 8% 증가
- 🍎 환산보정 ES 합 16.00: 1단계 (3년) 목표치의 2/3 달성. 2017 - 19 대비 126% 증가
- 🍎 1차년도 참여대학원생 논문 18편: 2017 -19 연평균 (15.7편) 대비 14% 증가

#### • BK 선정 평가 시 제시한 1단계 참여대학원생 연구실적 목표

- IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수 6편
- 환산보정 IF 합 매년 10% 증가
- 환산보정 ES 합 매년 10% 증가

#### ❖ 대학원생 우수 연구 성과



- 2차원 층상 전자화물에서 Weyl semimetal 발견 (Physical Review Letter, IF 9.161)
- 2D 적층 강자성 전자화물 물질 Gd<sub>2</sub>C에서 Weyl 반금속 상의 출현을 발견했음. 연구를 통해 Gd<sub>2</sub>C에서 전자화물 특성, 강자성 및 사소하지 않은 Weyl 밴드 토폴로지의 흥미로운 상호 작용을 확립하였을 뿐만 아니라 2D 적층 강자성 탄탄족 탄소화합물에서 토폴로지 Weyl 반금속 위상의 출현을 위한 가능성을 제시함. 2차원 층상 전자화물은 물리학 분야에서 새롭게 연구되고 있는 분야이며 이 선도적인 연구 결과는 물리학회 최고 권위자인 Physical Review Letters에 게재되었음.



- 광학적 위상학적 경계 상태 연구 (Nanophotonics, IF 8.449)
- 본 연구에서는 응집물질에서 발견된 위상학적 경계 상태를 도파모드공명을 발생시키는 평판형 광-공진격자 소자에서 구현하는 방법론을 제안하였음. 응집물질과는 달리 누출 손실에 의한 열린계로서 소위 비-허미션 (non-Hermitian) 성질을 갖는 평판형 광-공진격자 시스템의 위상학적 상전이 현상과 접합 경계에서 발현되는 위상학적 경계 상태의 발현 원리를 밝혔음. 이러한 위상학적 원리가 기존 평판형 광소자에 적용 되었을 때 성능 개선과 같은 잠재적 기술 응용 가치를 가지고 있다는 것을 보였음. 물리학의 원리와 기술적 응용간의 간극을 좁힌 본 연구 결과는 광학분야 상위 10% 이내 저널인 Nanophotonics에 게재되었음.



- 홀로그래피를 이용한 페르미온의 스펙트럼 유형 연구 (Journal of High Energy Physics, IF 5.81)
- 본 연구에서는 홀로그래피 이론을 이용하여 여러 가지 대칭성의 붕괴에 따라 생기는 다양한 질서변수의 존

재 하에서 페르미온 스펙트럼의 유형을 계산하고 분류하였음. 이러한 발견에 힘입어 여러 가지 물질에서 일어나는 양자상전이점 부근에서의 페르미온의 스펙트럼이 모두 같은 물리학에 의해 나타날 수 있다는 것을 예측하고, 이를 확인하기 위해 실험물리학자들과의 공동연구를 계획하고 있음. 물리학의 특정 연구 범위를 넘어 입자물리와 고체물리의 학제간 연구의 지평을 열게 할 수 있는 본 연구 결과는 해당물리 분야 5위에 랭크되어있는 Journal of High Energy Physics에 게재되었음.

## ❖ 참여교수 교육 대표 실적

### 📖 광학설계실습 (송석호 교수)

이론과목을 통하여 습득한 지식을 실제 응용에 적용하기 위한 실습 위주의 수업을 진행함으로써, 첨단 물리학적 지식의 활용성에 대한 안목을 넓히고, 새로운 가치를 창출할 수 있는 경험을 하도록 하였음. 파장보다 작은 극한광학계에서 일어나는 다양한 공명 현상들을 깊이 있게 이해하기 위해, 파동광학 (wave-optics) 및 회절광학 (diffractive optics) 위주로 광학 시뮬레이션에 대한 지식을 실습을 통하여 습득하도록 하였음. (2021년 1학기 개설).

### 📖 장상관계 1 (신상진 교수)

끈이론의 열린 끈과 닫힌 끈 사이의 상대성을 이용하면 강한 상호작용 하는 물질계의 동역학을 고전적 리만 기하학 이론으로 기술할 수 있음. 이러한 원리를 전자계에 적용하여 풀리지 않는 다체 물리학에 획기적인 발전을 가져오자 하는 것이 최근 끈이론의 중요한 이슈임. 본 과목에서는 학생들의 발표와 박사후 연구원 및 외부초청연사의 강의를 통해 이 분야의 가장 중요한 아이디어를 습득하고 최신동향을 파악하도록 수업을 구성하였음 (2021년 1학기 개설).

### 📖 다체계및위상물리 1 / 위상물리 2 (천상모 교수)

최근 양자위상물질에 대해 많은 연구가 진행되고 있는 현실에서 다체계 물리, 위상 절연체 및 위상 초전도 물리에 대해 소개하여 이론을 전공하는 학생 뿐 아니라 실험을 전공하는 학생도 수강도 할 수 있도록 교과목을 개발하였음. (각각 2020년 2학기과 2021년 1학기 개설).

## 1. 교육과정 구성 및 운영

### 1.1 교육과정 구성 및 운영 현황과 계획

#### ❖ 대학원 교육 과정의 전체 구성과 실적

##### 📖 교육 과정 전체 구성에 관련된 실적

- 본 교육연구팀은 극한물성 양자물질의 물리현상을 이해하고 창의적이고 독립적인 연구능력과 사회적 소통능력을 갖춘 인재를 양성하고자 대학원 교육과정을 개편하여 운영함.
- 기존 교육과정의 충실성, 지속성 반영
  - 교육과정은 크게 정규과목과 비정규과목으로 나누고 정규과목은 기초, 핵심, 심화, 실험연계과목으로 분류하여 연구에 필요한 과목을 입학 시부터 곧바로 수강할 수 있게 하였음.
  - 학생들이 매 학기 기초 핵심, 심화 혹은 실험연계과목 중에서 각 1과목씩 선택하여 수강함으로써 연구와 교육이 유기적인 연관성을 가지고 운영될 수 있도록 하였음.
  - 학생들의 연구 참여 기회를 독려하고 전공과목 선택의 다양성을 넓히고자, 그 동안 3학점 단위로 운영되었던 콜로퀴엄 과목을 1학점으로 줄여 운영하였음.
- 정규과목
  - 극한물성 양자물질 연구를 위해 정규 교과 과정을 교과과정위원회를 통해 개편하였음.
  - 기초과목: 2021년부터 역학/전자기/양자/통계과목을 한 학기에 한 과목씩 개설하였음.
  - 핵심과목: 연구에 필요한 전문 지식의 전달을 주요 목표로 하는 강의를 개설하였음.
  - 심화과목: 최신 연구 주제와 밀접하게 연계된 심화 지식을 강의하는 과목을 개설하였음.

<표 2-2> 1차년도 운영 교과목

	기초	핵심	심화	특성화	공통과목
1차년도 운영 교과목	2과목(6학점)	1과목(3학점)	4과목(12학점)	1과목(3학점)	1과목(1학점)

<표 2-3> 1년간 교육실적과 교과과정 편성표

구분	2020년 2학기	2021년 1학기	2021년 2학기	2022년 1학기	2022년 2학기
기초과목	통계역학	양자물리학	전자기학	역학	통계역학
핵심과목	고체물리학2			고체물리학1	고체물리학2
심화과목	다체계및위상물리	위상물리2	위상광자학	다체계1	다체계2
	반도체소재및물성	강상관계1	저차원반도체 물성연구	강상관양자 물질분광학	
			초끈이론과 강상관계		
특성화과목		광학실험실습		광학설계실습	
IC-PBL 과목			극한물성분석		초고압상변이와 수송현상
			양자물질 전자구조계산		저항변화메모리와 스핀트로닉스
공통과목	첨단물리특론	첨단물리특론	첨단물리특론	첨단물리특론	첨단물리특론

❖ 대학원 정규 교과목에 대한 최근 1년간 실적

- 본 사업에 특화된 연구 인력을 양성하기 위하여 대학원 정규과목을 기초, 핵심, 심화, 특성화, 공통연구과목으로 개편하였으며, 지난 1년간 10과목을 개설하였음. 운영현황과 차년도 계획은 다음과 같음.

<표 2-4> 1차년도 (2020.9.1.~2021.8.31.) 정규과목 개설 현황

구분	과목명	개설학기	학점 수	담당교수
기초과목	통계역학	2020년 2학기	3	
	양자물리학	2021년 1학기	3	신상진
핵심과목	고체물리학2	2020년 2학기	3	
심화과목	반도체소재및물성	2020년 2학기	3	김은규
	다체계및위상물리	2020년 2학기	3	천상모
	위상물리2	2021년 1학기	3	천상모
	강상관계1	2021년 1학기	3	신상진
특성화과목	광학실험실습	2021년 1학기	3	송석호
공통연구과목	첨단물리특론	2020년 2학기	1	신상진
	첨단물리특론	2021년 1학기	1	김재용

<표 2-5> 2차년도 (2021.9.1.~2022.8.31.) 정규과목 개설 계획

구분	과목명	개설학기	학점 수	담당교수
기초과목	고전전자기학	2021년 2학기	3	
	고전역학	2022년 1학기	3	미정
핵심과목	고체물리학1	2022년 1학기	3	
심화과목	극한물성분석	2021년 2학기	3 (IC-PBL)	김재용
	강상관양자물질분광학	2022년 1학기	3 (IC-PBL)	문순재
	초끈이론과강상관계	2021년 2학기	3	신상진
	위상광자학	2021년 2학기	3	송석호
	양자물질전자구조계산	2021년 2학기	3	조준형
	저차원반도체물성연구	2021년 2학기	3	정문석
	다체계1	2022년 1학기	3	천상모
특성화과목	광학설계실습	2022년 1학기	3	송석호
공동연구과목	첨단물리특론	2021년 2학기	1	김재용
	첨단물리특론	2022년 1학기	1	김재용

- 코로나 상황에서, 새롭게 구축한 온라인 플랫폼 HY-ON LMS와 온라인 강의 프로그램 줌을 활용하여 대학원 강의를 진행하였으며, 과제 및 시험을 통한 평가도 비대면으로 진행하였음.



[온라인 플랫폼 HY-ON LMS 화면]

### ❖ 학사관리 운영 및 지난 1년간의 실적

- 대학원 교육위원회 주관  
물리학과에서 본 교육 연구팀장 김재용 교수를 대학원교육위원장으로 임명하였고, 본 연구팀의 참여 교수인 문순재 교수, 정문석 교수, 천상모 교수가 교육 위원회에 참여하여 대학원 학사 관리의 전반적인 업무를 관할하였음.
- 대학원생 연구력 향상을 위한 조교 부담 경감  
코로나로 인해 온라인 실험 수업과 거리두기 단계별 실험 수업을 진행해야하는 상황을 해결하기 위하여, 본부와 논의하여 교육조교 TO를 기존 14명에서 19명으로 증원하였음. 또한, 학부봉사장학생 제도를 통해서 학부생 조교를 지난 1년간 7명을 선발하여 기초과목 이론 채점 봉사활동을 하였음. 이러한 방식으로 코로나 상황에도 불구하고 대학원생 조교 부담을 줄여나가고 있음.

## 장학금 운영 실적

본 연구팀과 관련된 장학금의 현황은 아래 <표 2-6>에 정리되어 있음. 본 교육연구팀은 참여 대학원생이 대학 본부에서 제공하는 장학금을 받을 수 있도록 여러 가지 장학 프로그램을 적극 신청하였음. 본 교육연구팀은 물리학과 교육위원회 활동을 통해서 장학생을 선발하였음. 또한, 본 교육연구팀 내에 우수연구 장학금을 신설하여 극한물성연구에 기여한 우수대학원생을 선발하여 BK 성과발표회에서 BK우수논문상을 수여 하였음. 구체적인 장학금 운영 실적은 아래와 같음.

<표 2-6> 본 교육연구팀에서 제공하는 장학금

명칭	내용	수혜 조건
석사 장학금	수업료 70%	학부성적 3.75/4.5 이상
학석사연계 장학금	수업료 50%	학사석사 연계과정 입학자
이공계 석박통합 장학금	학비 전액 면제	학부 졸업 GPA 3.75/4.5 이상
이공계활성화 장학금 (RA, TA)	입학금 및 수업료 50% 면제	입학성적 우수
한양국제 장학금	등록금 50 ~ 100%	외국인 입학생 대상 GPA > 3.5/4.5
Teaching Fellow	학기당 66만원	박사수료생 강사조건 구비
재직교수 장학금	연 240만원 (4명)	성적우수
한기수 장학금	입학시 300만원 1회 (5명)	입학성적 우수
BK-RA/TA 장학금 (2020년 9월 신설)	학기당 300만원	BK 참여 우수 대학원생 (본부 신설)
BK 우수논문상 (2020년 9월 신설)	최우수 (1명), 우수 (3명)	BK 참여 우수 대학원생 (본 팀내 신설)

- 한기수 장학금  
물리학과동문(80학번 한기수)이 기부한 장학금으로 본교 물리학과를 졸업한 우수한 대학원 입학생 5명을 선발하여 300만원씩을 지원하였음 (본 교육연구팀에서 3명 선발).  
일시: 2021.4.28. 수상자:
- 성적우수자 교육봉사 장학금  
학부 3, 4학년 학부생이 자원하여 전공코어과목의 채점조교업무를 수행하고, 소정의 장학금과 표창장을 받을 수 있는 교육봉사제도를 실시하였음.

<표 2-7> 학부생 교육봉사 장학생 현황

과목명	2020년	2021년
고전역학		
전자기학		
양자역학		
열및통계물리학		
수리물리학		

- Teaching Fellow 장학금 ( 학생: 2021년 1학기)  
본 프로그램은 대학원생들이 학부강의에 참여하게 함으로써, 대학원생들이 우수 연구자로 성장하는데 필요한 경험을 제공하는 것을 목표로 함. 참여대학원생인 학생은 2021년 1학기 고전역학 1의 Teaching Fellow를 수행하면서 학부생에게 3회의 강의를 하고, 수강생들의 문제해결을 도왔음.
- BK-RA/TA 연구장학금 (2020년 9월 신설)  
매학기 4단계 BK 교육연구팀 소속 대학원생에게 Research Assistant(RA)/ Teaching Assistant(TA) 장학금을 제공하고, 그에 알맞은 교육 프로그램을 제공하여 참여대학원생이 연구역량과 교육역량을 강화할 수 있도록 하였음.

<표 2-8> BK-RA/TA 연구장학금 현황

	2020년 2학기	2021년 1학기
BK-RA/TA 장학금		

- BK 우수논문상 (2020년 9월 신설)  
본 연구팀은 BK 우수논문상을 2020년 9월 BK 운영위원회를 통하여 신설하였음. 우수논문을 출간한 참여대학원생에게 장학금을 지급하고, 우수한 연구를 장려하였음. 수상자는 다음과 같음.  
일시: 2021년 1월 28일, 수상자:  
일시: 2021년 7월 20일, 수상자:



[2021년 1월 28일 장학금수여식]



[2021.4.28. 장학금 수여식]



[2021년 7월 20일 장학금수여식]

### ❖ BK 성과 발표회

- 참여 대학원생의 연구 의욕을 고취하고 연구 역량을 제고하기 위해, BK 운영위원회에서 매년 2회(1월, 7월)의 BK 성과발표회를 개최함. 이를 통해 대학원생들의 연구 결과를 공유하고, 우수 연구를 수행한 대학원생에게 최우수상, 우수상, 장려상을 수여하고 장학금을 지급함.
- 그 동안 2번의 성과 발표회를 진행하였고, 7명의 우수 대학원생에게 상장 및 장학금을 수여하였음.  
일시: 2021년 1월 28일, 수상자:  
일시: 2021년 7월 20일, 수상자:



[성과발표회 포스터 및 온라인 발표 영상 (Zoom을 통한 비대면 운영)]

<표 2-9> 1차년도 성과발표회 발표자와 발표 제목

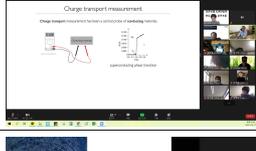
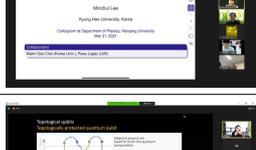
2020년 2학기 성과 발표회 (2021.1.28)		2021년 1학기 성과발표회 (2021.7.20)	
발표학생	제목	발표학생	제목
박사	Doping and temperature evolutions of optical response of $Sr_3(Ir_{1-x}Ru_x)_2O_7$		Structure and Raman Study of Potassium Hydrides under High Pressure
	XFEL-induced new tungsten hydride phase under extreme conditions		Structural characteristics and defect states for undoped GaN epi-layers grown on GaN and sapphire substrates by MOCVD
	Photoelectric Characteristics of a Large-Area n-MoS <sub>2</sub> /p-Si Heterojunction Structure Formed through Sulfurization Process		Infrared spectroscopic study of doping and temperature dependences of electronic structures in the bilayered perovskite $Sr_3(Ir_{1-x}Mn_x)_2O_7$
	Flat optical element using Geometric phase		Geometric phase를 이용한 다초점 렌즈
	Emergence of the Topological Liquid and the Strange metal near the Quantum Critical Point		Topological Material in Holography
	Ferromagnetic Weyl Fermions in Two-Dimensional Layered Electride Gd <sub>2</sub> C		Development of Vibrational Nanoscopy and Its Applications
	Threshold switching behaviors and thermal stability of ZnTe selectors by nitrogen annealing		Effect of hole doping on superconductivity in compressed CeH <sub>9</sub> at high pressures
	Particle-Antiparticle Duality and Fractionalization of Topological Chiral Solitons		Dynamics of topological objects
			Exploring advancing bipolar resistive switching behaviors in oxygenated carbon oxides via ultrathin Cu insertion layer

◆ BK 세미나 시리즈 개설

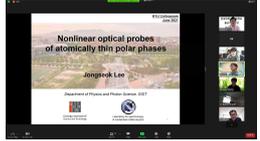
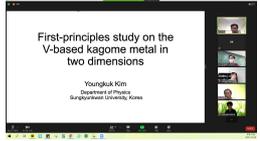
- 본 교육연구팀 연구분야 및 인접 분야의 최신 동향을 습득하고 차세대 학자를 발굴할 목적으로 BK세미나 시리즈를 개설함. 양자물질 연구 분야 국내외 전문가들을 초빙함.
- 양자물질 연구분야 국내외 전문가를 초청하여 총 47회의 세미나를 진행함 (<표 2-10> 참조).

<표 2-10> 1차년도 BK 세미나 시리즈 목록

연번	일시	강연자 (소속)	제목	증빙자료
1	2020년 10월 15일	박사 (성균관대학교 물리학과)	Study of the relation between magnetism, superconductivity and quantum criticality on 4f-electron compounds under extreme conditions	
2	2020년 10월 20일	교수 (UNIST 신소재공학과)	Low-dimensional Nanomaterials into Functional Devices	
3	2020년 10월 22일	교수 (성균관대학교 에너지학과)	Unveiling the Physics of Emerging Materials with Novel Spectroscopy	
4	2020년 10월 27일	박사 (Center for Artificial Low Dimensional Electronic Systems, IBS)	Topological superconducting phase in high-Tc superconductor MgB2 with Dirac-nodal-line fermions	
5	2020년 10월 29일	교수 (U of Minnesota, Dept of EE)	Nanogap Resonators for Extreme Polaritonics	
6	2020년 11월 03일	교수 (인천대학교 물리학과)	Experimental observation of the Berry curvature by angle-resolved photoemission	
7	2020년 11월 10일	박사 (포항가속기연구소 PAL-XFEL)	Investigations of magnetic ground and excited states emerging from spin-orbit coupling in strongly correlated electron system	
8	2020년 11월 17일	교수 (대구대학교 물리학과)	Chiral anomaly effect in electrical transport of Bi0.96Sb0.04	
9	2020년 11월 24일	박사 (한국원자력연구원)	Helical magnetic state induced by chemical substitution in a polar antiferromagnet (Ni,Mn)3TeO6	
10	2020년 11월 26일	교수 (Old Dominion U. Dept of ECE)	How to convert perovskite grain boundaries to be thermally stable?	

11	2020년 11월 30일	교수 (이화여자대학교 물리학과)	Hunting for black hole binaries with gravitational waves	
12	2020년 12월 01일	교수 (UNIST, 물리학과)	Correlated phenomena by relativistic spin-orbit coupling	
13	2020년 12월 28일	박사 (European X-ray Free-Electron Laser (XFEL) Facility)	Current Status of Single Particle Imaging Project & 3D Visualization of Phase-Ordering with X-ray Sources	
14	2021년 03월 10일	교수 (한양대학교 물리학과)	Exploring the Physics of 2D Semiconductors Using Vibrational Nanoscopy	
15	2021년 03월 17일	교수 (KAIST 물리학과)	Unconventional Spin Transport in Quantum Materials	
16	2021년 03월 23일	교수 (세종대학교 물리천문학과)	Why do we collide heavy ions? at the LHC?	
17	2021년 03월 24일	교수 (서울대학교 전기전자공학부)	Disordered Photonics: Engineering the Intermediate Regime	
18	2021년 04월 06일	교수 (중앙대학교 물리학과)	Time - periodically Driven and Disordered Topological Systems	
19	2021년 04월 06일	교수 (DGIST)	Squeezing the best out of 2D materials	
20	2021년 03월 31일	교수 (경희대학교 응용물리학과)	Majorana signature in dissipation via chiral topological superconductors	
21	2021년 04월 07일	교수 (중앙대학교)	Engineering and Observation of Majorana Zero modes	
22	2021년 04월 13일	교수 (경북대학교 물리교육과)	Searching superconductivity in low dimensional materials from conventional to unconventional	

23	2021년 04월 14일	교수 (강원대학교 물리학과)	Twisted quantum world of spin-orbit entanglement	
24	2021년 04월 20일	교수 (부산대학교 물리교육과)	Correlated topological phases in strongly correlated heterostructures	
25	2021년 04월 27일	교수 (성균관대학교 물리학과)	Dirac electrons in a dodecagonal graphene quasicrystal	
26	2021년 04월 28일	교수 (DGIST 물리학과)	Visualizing Quantum States of Materials using Scanning Tunneling Microscopy	
27	2021년 05월 04일	교수 (경희대학교 응용물리학과)	Topological phase transition and selective charge Anderson localization as a route to enhance thermoelectric performance	
28	2021년 05월 11일	교수 (성균관대학교 물리학과)	Exchange Interaction induced by Chiral Phonons	
29	2021년 05월 12일	박사 (고등과학원)	Introduction to quantum optical sensing: from fundamentals to applications	
30	2021년 05월 14일	박사 (National High Magnetic Field Laboratory)	Frustration-induced Athermal Behaviors: Hilbert Space Fragmentation and Quantum Many-Body Scars	
31	2021년 05월 18일	교수 (부산대학교 물리학과)	Photoemission study on the Kondo effect in graphene	
32	2021년 05월 25일	교수 (서강대학교 물리학과)	Scanning probe microscopy studies in functional oxide films: from ferroelectricity to local transport	
33	2021년 05월 26일	교수 (경북대학교 물리학과)	Mapping of magnetic anisotropy for van der Waals materials	
34	2021년 06월 01일	교수 (카이스트 물리학과)	Unconventional dynamics of ferrimagnets	
35	2021년 06월 02일	교수 (성균관대학교 에너지학과)	Optical Transition between Metal and Semiconductor in Graphene and MoS2	

36	2021년 06월 08일	교수 (전북대학교 물리학과)	Scrutinizing local atomic structures in functional materials using synchrotron X-ray absorption spectroscopy	
37	2021년 06월 09일	교수 (광주과학기술원 물리광과학과)	Nonlinear optical probes of atomically thin polar phases	
38	2021년 07월 08일	교수 (성균관대학교 물리학과)	The V-based kagome metals in two dimensions	
39	2021년 07월 15일	교수 (포스텍 물리학과)	Role of generic scale invariance in a Mott transition from a U(1) spin-liquid insulator to a Landau Fermi-liquid metal	
40	2021년 07월 22일	박사 (Max Planck POSTECH Korea Research Initiative)	Harnessing topology and correlations from singularities in 3d-kagome metals.	
41	2021년 07월 29일	교수 (한양대학교 물리학과)	Topological Phenomena and Phase Transition	
42	2021년 07월 29일	교수 (카이스트 물리학과)	Towards exploring quantum spin liquid in Kagomé optical lattice	
43	2021년 07월 29일	교수 (서울대학교 물리천문학부)	Enhanced superconductivity in the vicinity of CDW quantum critical points in Pd-intercalated TaSe2	
44	2021년 08월 05일	박사 (KIAS APCTP)	Quantum Monte Carlo Simulation of SYK Model	
45	2021년 08월 10일	박사 (한국원자력연구원)	Catalytic Conversion of Hydrogen Spin States at Low Temperature	
46	2021년 08월 12일	교수 (카이스트 물리학과)	Emerging New Quantum Phases in GaTa4Se8 under pressure	
47	2021년 08월 27일	박사 (서울대학교 기초과학연구원)	다체계 결맞음 (Coherence)과 초전도 현상	

❖ **교육과 연구의 선순환 구조 구축 및 연구역량의 교육적 활용 방안**

극한물성 연구에 특화된 과목들이 연구내용에 직접 적용되고 연구에서 얻은 결과들이 교과과정에 반영되는 등 교육과 연구가 선순환구조를 유지하는 것은 첨단연구를 수행하는데 있어 매우 중요함. 아래 그림은 극한물성연구를 수행함에 있어 교육과 연구가 얼마나 직접적으로 연관되어 있는지를 보여주는 개념도임. 예를 들어, 이론계산으로 모델을 제시하면 이를 실험결과에 적용할 수 있고 국제공동 연구를 통하여 연구결과를 검증하고 이를 반영하여 새로운 특성화 과목을 개설함. 우수한 논문을 발표하여 우수인재를 유치하고 이들의 지적 호기심이 다시 연구 동기를 유발하여 새로운 교과목을 개발할 수 있음. 물론 이와 반대의 경우도 고려할 수 있음. 이렇듯 양자물질 극한물성을 연구함에 있어 개설하는 모든 교과목들은 연구결과에 직접 연결되어 선순환 구조를 이루도록 할 것임.



[교육과 연구의 선순환 구조를 나타내는 개념도]

- 연구와 교육이 선순환 구조를 이루기 위해 학교정책으로 시행하는 대학원생 중심의 연구지원 체계를 도입하고자 함. 학생들이 연구에서 좋은 결과를 얻어야 학습할 의욕도 생기고 다시 긍정적인 의욕이 연구 동기를 유발하듯, 연구의 주역인 대학원생의 독립된 연구를 독려할 계획임.
- 연구와 교육의 선순환이 가능한 다양한 특성화과목을 개설하기 위하여 응집물질물리 실험분야 전공자 1명 (정문석 교수)을 신입교원으로 초빙하였음.
- 2단계에서 응집물질물리 실험분야 교원을 추가 충원하여 연구력과 교육과정을 보강할 계획임.

1.2 과학기술·산업·사회 문제 해결과 관련된 교육 프로그램 현황과 구성 및 운영 계획



[과학기술 문제 해결을 위한 교육 구성과 계획]

## ❖ 과학기술·산업·사회 문제 해결과 관련된 교육 프로그램 실적

### 📦 과학기술산업사회문제해결을 위한 실험실습 프로그램

#### • 광학실험실습 (2021학년도 1학기)

본 교육연구팀이 소속된 물리학과는 (주)의 지원으로 자연과학관에 대규모 청정 항온항습 실험실을 구축하였음. 본 교육연구팀은 이를 적극 활용할 수 있는 IC-PBL 교과목 “광학실험실습”을 2021학년도 1학기에 개설하였음. 대부분의 대학에서 실험실습 교과목은 학부 교육과정에만 개설되어 있음. 하지만 본 교육연구팀은 과학기술 분야 뿐 아니라 산업·사회 분야의 문제 해결에 직접적으로 연관되는 실험실습 과목이 대학원 교육과정에도 필요하다는데 의견을 모으고, 해당 교과목을 교과과정에 포함시켰음. 본 강의에서는 실제 연구에 사용되는 장비들을 활용함으로써 실제 대학원 과정의 연구에 도움이 되도록 하였으며, 수강생이 직접 광학시료제작/측정/분석 과정을 수행하였음.



[자연과학관 지하2층에 위치한 광학실험실]

## ❖ 과학기술·산업·사회 문제 해결과 관련된 교육 프로그램 계획

### 🎯 대학원 교육과정에 실습 교과목 운영

### 🎯 공과대학과의 연계 프로그램 운영

### 📦 대학원 실습 교과목 운영

#### • 광학설계실습

본 강좌에서는 Virtual Lab. 이라는 전산모사 프로그램을 활용하여 고집적 고효율 광소자 및 반도체 소자를 설계하는 실습을 진행함. 강의에서는 광학설계에 필요한 기본 부품들의 특성, Virtual Lab. 프로그램 사용법을 소개함. 기본적인 이론을 익힌 후에는 실제 광소자 및 반도체 소자에 활용되는 새로운 부품을 설계하거나 기존 부품을 개선하여 집적도 및 효율성이 향상된 부품을 설계하는 실습을 진행함.

#### 📦 나노반도체학과와의 연계 프로그램 운영

본 교육연구팀 참여교수인 홍진표 교수는 2007년 6월부터 본교 나노반도체 공학과 겸임교수로서 “차세대 반도체 핵심 인력 맞춤형 교육사업”의 일환으로 SK하이닉스와 산학연계 프로그램에 참여하고 있음. 또한 나노반도체학과와의 효율적인 운영과 산학협력의 원활한 진행을 위하여 설립된 운영 위원회에도 참여하고 있음. 산업과 직접적으로 연계된 본 학과의 교육목표는 나노미터단위 극한 크기로 집적도가 높아진 반도체 소자의 동작원리를 양자역학적인 측면에서 규명하는 것이며, 이에 필요한 물리학기반 산업계 연관 젊은 인재를 교육하는 것임. 본 연계프로그램은 융합과목 이수를 통하여 국내의 반도체 산업 및 전자소자 산업계는 물론이고 관련 과학기술계 및 학계에 이바지할 수 있는 나노반도체소자, 회로 및 재료분야의 우수한 전문 인력을 양성해오고 있음. 전공분야는 양자물성을 기반으로 나노반도체소자, 나노공정, 고집적회로설계, 시스템 운영, 패키지의 분야가 있으며, 참여하는 대학원생에 대한 혜택으로는 대학원 합격과 동시에 SK하이닉스 취업, 대학원생 전원 등록금 수혜 (학비 전액 및 학비보조금), SCI급 논문 인센티브 지급, 방학 중 SK하이닉스 인턴십 참여, SK하이닉스 사업장 견학 (중국사업장), 개인 노트북 지급, 영어 합숙 프로그램 지원 등이 있음.

산학 공동연구를 통해 선발-교육된 물리기반 반도체분야의 우수인력들은 졸업 전 우선적으로 SK하이닉스에 채용되고 있으며 본 연계 프로그램은 산업분야 인력 향성에 기여 하고 있다고 판단함.

#### IC-PBL 강좌 운영 계획

본 교육연구팀의 핵심 주제인 양자물질 극한물성 분야의 문제 해결을 위한 IC-PBL 강좌를 운영하였고 앞으로 확대 운영할 계획임. 해당 강좌의 구체적인 내용은 아래와 같음.

- 표면경계현상과에너지저장/극한물성분석 (2019학년도 2학기 운영, 2022학년도 2학기 운영 예정)  
본 교육연구팀 팀장인 김재용 교수는 각종 실험 장비들을 활용하여 양자물질의 표면 또는 경계에서 일어나는 극저차원 물리 현상을 측정하고 분석하는 내용에 대한 IC-PBL 강의를 진행하였음. 본 강의에서는 양자물질의 표면과 경계면에서 일어나는 물리·화학적 성질을 저차원에서 이해하고 분석하는 기법을 익힘으로써 물질의 구조 현상을 원자단위의 극한 차원에서 이해하는 것을 목표로 하였음. 표면 현상은 박막흡착, 자기조립, 층상구조형성 등 2차원 물질이 3차원 구조체로 발전해가는 과정을 심도 있게 다루었음. 분석 방법으로 방사광, 중성자등 대형 연구 시설뿐만 아니라, X-ray, 투과전자현미경, 원자힘현미경 등 여러 분석 장비의 원리와 사용법에 관한 지식을 습득하도록 하였음. 심화 내용으로 극한 환경에서 나타나는 초전도 현상에 대한 최신 연구 주제를 소개하고 극한 환경에서 나타나는 새로운 물성을 설명하였음. 2019학년도 2학기 운영하였으며, 2022학년도 2학기에 극한물성분석에 초점을 두고 개설할 예정임.
- 전자구조계산/양자물질전자구조계산 (2020학년도 1학기 운영, 2021학년도 2학기 운영 예정)  
본 교육연구팀 참여교수인 조준형 교수는 밀도범함수 이론을 이용하여 양자 물질의 극한 상황에서의 전자구조를 계산하는 내용에 대한 IC-PBL 강좌를 운영함. 본 강의에서는 고체의 구조, 전기 및 자기 물성을 해석하는 제일원리 전자구조 계산에 대한 이론 및 사용 방법을 소개함. 많은 원자핵과 전자로 구성된 양자물질의 성질을 이해하기 위해 광범위하게 사용되고 있는 밀도범함수 이론을 공부하고 이를 사용하여 개발된 최신 프로그램 코드의 사용법을 익힘. 배경 이론과 사용법을 익힌 후에는 물질 내 전자가 가질 수 있는 에너지 준위 (밴드) 및 파동함수를 얻어 양자물질의 다양한 물성들을 정량적으로 계산하는 실습을 진행함. 최종적으로 현재 자연계에 존재하지 않는 새롭고 유용한 물성을 가질 수 있는 물질을 예측하는 과제를 수행. 2020학년도 1학기 운영에 운영하였으며, 2021학년도 2학기 운영 예정.

#### 양자물질 극한물성 분야에 특화된 교과목 개설 계획

- 극한물성분석 (2021학년도 2학기 개설 예정)  
극한 환경에서 양자물질의 물성과 그 측정방법에 대해 다루는 강의를 2021학년도 2학기에 개설하기로 함. 극한환경을 조성하는데 필요한 기본 지식과 실험적인 방법 등을 소개하고 이에 대한 실습을 진행할 것임. 특히 물성을 결정하는 중요 변수인 온도 및 압력의 영향에 대해 집중적으로 다룸. 특히 초고압-초고온 혹은 초저온 등 극한 상황에서 발생하는 물질의 구조와 상전이, 전기 광학적 특성 그리고 물리·화학적 새로운 현상에 기반한 신물질 개발에 필요한 지식과 극미량시료의 물성 분석에 필요한 지식을 함양하는 것을 목표로 함. 기존 실험실에서의 극한환경 재현과 초미량 소재의 물리·화학적 성질을 규명할 수 있는 실험적 방법을 탐구함으로써, 대학원생들이 최근 연구경향을 이해할 수 있는 지식을 갖출 수 있을 것임.
- 초고압상변이와 수송현상 (2022년 2학기 개설 예정)  
압력을 변수로 하여 초전도 및 전자의 수송현상을 탐색하는 과목임. 온도-압력 상변이에 연관된 초전도 이론과 이를 측정하는 기법이 융합된 과목. 이론중심 수업에서는 해외공동연구를 수행하고 있는 해외 유명 학자들의 원격강의를 포함하고, 실습중심에서는 실험을 통해 취득한 결과를 학생들로 하여금 직접 분석하도록 할 예정. 이론과 실습이 융합된 연구중심형 과목이며 창의형 IC-PBL 과목으로 운영할 예정임.

- 양자물질전자구조계산 (2021학년도 2학기 개설 예정)

초전도체와 같이 극한상태에서 물성이 발현되는 물질에 대한 연구가 오랜 기간 동안 물리학계의 연구 과제로 여겨져 왔음. 상온 초전도체는 오랫동안 해결되지 않은 응집물질물리학의 난제임. 상온 초전도체가 실현된다면 전력산업뿐만 아니라, 초정밀 전자소자, 초고속 전자소자 등 다양한 분야에 초전도체가 본격적으로 사용될 것임. 불행히도 상온에서 작동하는 초전도물질은 아직 발견되지 않았으나, 최근 고압에서 수소화물이 상온 초전도체가 될 수 있다는 가능성이 제안되어, 이에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있음. 상온에서 발생하는 초전도 현상의 BCS 기반 초전도메커니즘을 전자에너지 띠 이론으로 이해하고, 제일원리 밀도범함수이론 기반의 물질 설계 방법을 통해 초고압 하에서 형성된 금속 수소화물 물질군을 예측하여 백만기압 단위에서 가능한 상온 초전도체를 구현하는 수업을 진행할 예정임.

- 강상관양자물질분광학 (2022학년도 1학기 개설 예정)

분광 실험법은 물리, 화학, 생물, 지구과학 등 과학 분야 전반에 걸쳐 널리 사용되는 기술임. 분광 실험은 물질의 전자 구조와 전도 전하들의 동역학 특성, 분자 진동 모드 등에 대한 정밀하고 정량적인 정보를 제공함. 본 강의에서는 광분광 실험법, 광전자 분광법, X-선 흡수 분광법, 중성자 산란, 시간 분해 분광법 등에 대한 기본 원리에 대해 강의할 예정임. 그리고 다양한 분광법들의 적용 사례를 최신 연구 논문 리뷰를 통해 소개함. 특히 본 교육연구팀의 주제인 양자물질의 극한물성에 대한 깊이 있는 소개를 위해 전하/스핀/격자/오비탈 상호 작용이 강한 양자물질의 특성에 대해 소개하고, 극한 환경에서 이들 물질의 특성을 조사한 최신 연구 결과들을 리뷰하려 함.

- 과학기술 국제 계절학교 개최

대학원생들을 우수한 연구자로 양성하기 위해서는 정규교과 과정 교육 뿐 아니라 해당 분야의 문제 해결에 직접적으로 도움이 되는 실험실습 교육이 필수적임. 특히 본 교육연구팀의 교육 및 연구의 주제인 양자물질의 극한물성 연구에는 일반적으로 잘 사용되지 않는 특별한 실험 환경과 물성 측정법이 사용됨. 국제공동연구 활동의 일환으로 김재용 교수는 중국 북경고압연구센터, 미국 카네기연구소와 함께 다이아몬드 앤 빌셀 정렬 관련 현재 세계 최고의 기술과 노하우를 보유하고 있는 세계적인 석학들을 초청하여 고압연구관련 이론부터 실습까지 연구원들을 대상으로 교육·훈련할 예정임.

- 국제 석학 초청 강좌 개설

최근 양자물질의 극한물성 연구분야에서 널리 주목을 받고 있는 국내외 석학들을 초청하여 단기강좌를 개설 예정임. 주로 방학 기간을 활용하여 진행하며 대학원생들의 연구에 실질적인 도움이 되는 주제를 선정하여 강좌를 개설할 계획임.

- 국제학회를 연계한 특성화 교육

김재용 교수는 매년 또는 격년으로 양자물질 극한물성 분야의 국제 학술대회를 조직하고 운영하고 있음. 양자물질 극한물성 연구는 현재 새롭게 태동하고 있는 분야임. 해당 분야에 대한 질 높은 교육 및 연구를 수행하기 위해서는 국내외 연구자들과의 연구 성과 교류가 절대적으로 필요함. 이를 위해 본 교육연구팀은 양자물질 극한물성 분야의 국제학술대회를 지속적으로 개최하고자 함.

이미 본 교육연구팀 참여교수들은 2020년 11월 22일부터 11월 26일까지 5일간 10th Asian Conference on High Pressure Research를 제주에서 개최할 준비를 하고 있음. 본 국제학술대회는 19th International Conference on High Pressure Semiconductor Physics와 3rd International Workshop on High Pressure Study on Superconductors와 연계하여 진행됨. 김재용 교수가 조직위원장을 맡고 있으며, 조준형 교수, 문순재 교수, 천상모 교수가 조직위원으로 활동 중임. 본 국제학술대회를 통해서 대학원생들에게 연구 결과를 영어로 발표하는 기회를 부여하고, 해외 저명 학자들과의 교류할 수 있는 기회를 제공할 예정임.

## 2. 인력양성 계획 및 지원 방안

### 2.1 최근 1년간 대학원생 인력 확보 및 배출 실적

<표 2-11> 교육연구팀 소속 학과(부) 참여대학원생 확보 및 배출 실적

(단위: 명)

대학원생 확보 및 배출 실적					
실적		석사	박사	석·박사 통합	계
확보 (재학생)	2020년 2학기	8	4	15	27
	2021년 1학기	11	4	18	33
	계	19	8	33	60
배출 (졸업생)	2020년 2학기	1	1		2
	2021년 1학기	1	-		1
	계	2	1		3

### 2.2 교육연구팀의 우수 대학원생 확보 및 지원 계획

#### ❖ 우수 대학원생의 확보 및 지원 계획

##### 📖 단계별 우수 대학원생 확보 계획

- 우수 대학원생 확보 계획을 2단계로 나누어 1단계에서는 양적, 2단계에서는 질적 향상을 추구
- 1단계 기간 동안 학생 지원 수를 선별입학이 가능할 수준으로 늘리고, 2단계에서는 엄정한 학사관리를 통해 졸업에 필요한 자격미달 시 탈락도 감수하여 대학원생 질적 향상을 도모

##### 📖 본교 졸업생 대학원 유치 계획

- 학부 논문 연계지도, 학부생 학술 활동 프로그램, 대학원 박람회, 심포지엄을 통해서 우수한 본교 졸업생을 대학원에 유치

##### 📖 해외 우수 유학생 유치 계획

- 7개의 기관과 체결한 MoU, 베트남과 태국와의 다양한 프로그램을 통해 우수 외국 학생을 유치
- 한양대 외국인 학생 유치사업  
우수한 외국인 학생을 한양대에 유치함으로써 재학생들과의 선의의 경쟁을 유도하고, 이를 통해 상호간의 질적 향상을 기대할 수 있고 졸업 후에 세계 곳곳에서 핵심적인 역할을 함으로써 본교의 국제적 위상을 높이는데 큰 역할을 하게 됨. 한양대학교는 우수한 외국인학생 유치에 많은 투자를 하고 있음. 현재 외국인 유학생 6700 여명 중 3000여명의 학위과정 유학생들이 본교에 재학 중에 있음. 이 프로그램을 적극 활용하여 해외 우수 유학생을 유치할 계획임.

#### ❖ 우수 대학원생의 확보 실적

##### 📖 본교 졸업생의 대학원 진학률 증가

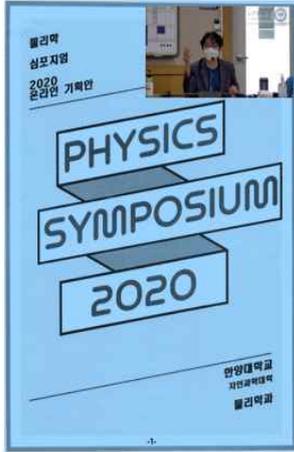
- 2020년 16%에서 2021년 17%로 증가하였음.

<표 2-12> 본교 졸업생의 졸업 후 진로 및 본 대학원 진학률

년도	총졸업생	본대학원	타대학원	유학	취업	기타	본 대학원 진학률
2020년	44	7	5	1	13	18	15.9 %
2021년	23	4	5	2	3	9	17.4 %

### 대학원 진학률 증가를 위한 심포지엄 실시

- 본교 졸업생의 대학원 진학률 증가를 위해, 2020년 9월 25일 온라인 심포지엄을 실시하였음.
- 교수 (9명), 대학원생 (12명), 학부생(53명)이 함께 참여하여, 학부생들에게 대학원생활 및 학과교수들이 수행하는 연구내용을 소개하였음.



시간	내용	비고
13:00-13:10	개회사	세부 연구 분야 소개
13:00-13:20	학과소개	
13:20-14:10	연구실 소개 1부 (50분)	각 연구실 소개
14:10-14:20	질의 응답 (10분)	
14:30-15:20	연구실 소개 2부 (50분)	각 연구실 소개
15:20-15:30	질의 응답 (10분)	
15:30-16:30	연구실 소개 3부 (50분)	각 연구실 소개
16:30-16:40	질의 응답 (10분)	
16:40-16:50	휴식	
16:50-17:30	교수-학부생 간담회	
17:30-18:00	경품 추첨 및 설문조사	

[2020년 9월 25일 심포지엄 프로그램 및 줌 화면]

### 해외 우수 유학생 유치

- 한양대 외국인학생 유치사업을 통해 우수학생으로 선발되어 (태국, 지도교수: 신상진) 학생이 입학하였음.
- 중국 길림대학교 물리학과, Keystate Laboratory for Superhard Materials 소속 박사과정 생을 김재용교수 연구실에 장기 파견하여 고압수소화물관련 국제공동연구를 수행하기로 함 (2021.10.01. 시작)

### 2.3 참여대학원생의 취(창)업의 질적 우수성

<표 2-13> 2020.2월 졸업한 교육연구팀 소속 학과(부) 참여대학원생 취(창)업률 실적

구 분		졸업 및 취(창)업현황 (단위: 명, %)					취(창)업률% (D/C)×100	
		졸업자 (G)	비취업자(B)		취(창)업대상자 (C=G-B)	취(창)업자 (D)		
			진학자	입대자				
		국내		국외				
2021년 2월 졸업자	석사	2	-	-	-	2	1	33.3%
	박사	1	X		-	1	-	

○ (2021년 2월 박사졸업) - LG디스플레이

2019년 LGenius 석사과정 장학생으로 입학하여, “실리콘 반도체박막 결함제어와 TFT 신뢰성 향상을 위한 in-situ 분석기법” 및 “초고효율, 고전력 화합물반도체 소재/소자 결함공학 연구실”의 과제에 연구보조원으로 참여하였음. 학위과정 동안 실리콘 도핑된 산화갈륨 박막의 Pulsed Laser Deposition (PLD) 증착 및 후열처리 공정들을 통한 고감도의 deep UV 광센서 제조공정에 관한 연구를 진행하였음. 이와 관련하여 한국반도체학술대회, 한국물리학회, 한국진공학회에 참가하여 연구내용을 발표하였고, 학위논문 내용을 Journal of Alloys and Compounds 학술지에 주저자로 게재하였음. 학위과정 동안의 소자제조 및 특성평가에 대한 연구경험은 2021년 졸업과 동시에 취업한 LG 디스플레이 OLED TFT 연구에 직접적인 도움이 되었음.

### 3. 참여대학원생 연구실적의 우수성

#### ① 참여대학원생 저명학술지 논문의 우수성

##### ❖ 1차년도 참여대학원생 연구실적

<표 2-14> 참여대학원생 연구실적

	1차년도	2017-19 연평균	1단계 목표 (~2023)
IF $\geq$ Phys. Rev. Lett. 논문 수	3	1.67	6
환산보정 IF 합	3.59	3.31	10.92
환산보정 ES 합	16.00	7.09	23.40

- 🎯 IF  $\geq$  Phys. Rev. Lett. 논문 수 3편
- 🎯 환산보정 IF 합 3.59: 1단계 (3년) 목표치의 1/3 달성. 2017 - 19 대비 8% 증가
- 🎯 환산보정 ES 합 16.00: 1단계 (3년) 목표치의 2/3 달성. 2017 - 19 대비 126% 증가
- 🎯 1차년도 참여대학원생 논문 18편: 2017 -19 연평균 (15.7편) 대비 14% 증가

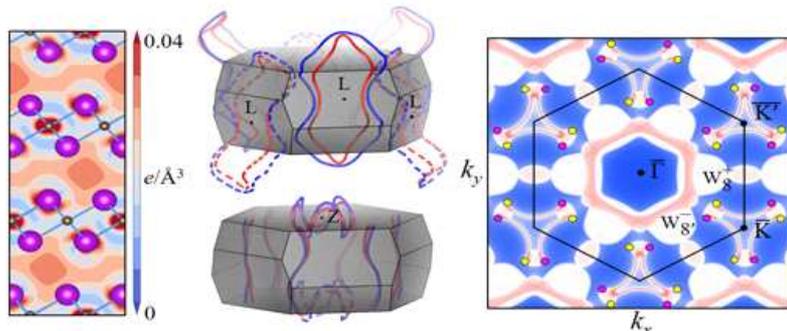
- BK 선정 평가 시 제시한 1단계 참여대학원생 연구실적 목표
  - IF  $\geq$  Phys. Rev. Lett. 논문 수 6편
  - 환산보정 IF 합 매년 10% 증가
  - 환산보정 ES 합 매년 10% 증가
- 참여대학원생의 1차년도 연구실적을 통해 본 교육연구팀 참여대학원생의 연구역량이 계획한 대로 향상되고 있음을 알 수 있음.

##### ❖ 1차년도 참여대학원생 대표 연구실적



#### 2차원 층상 전자화물에서 Weyl 반금속 발견 - Physical Review Letters (IF 9.161)

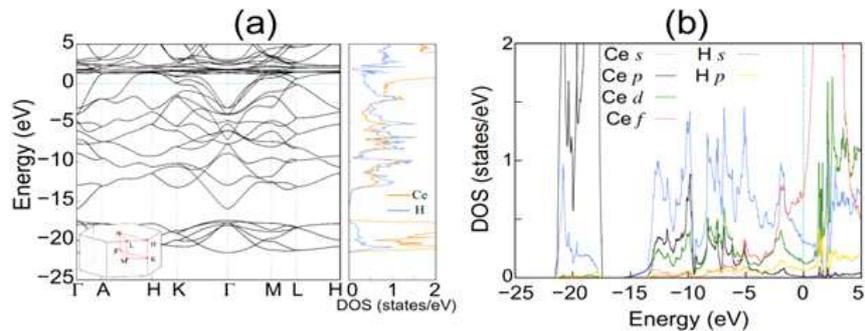
2차원 층상 전자화물은 양이온 층 사이의 틈새 공간에 음이온 전자를 보유하는 새로운 부류의 물질로 등장했음. 반전 대칭이 깨진 Weyl 반금속과 달리 시간-역전 대칭을 깨는 자성 Weyl 반금속은 실험적으로 오직 삼원계 비전자화물 화합물에서만 구현됨. 본 연구를 통해 2D 적층 강자성 전자화물 물질 Gd<sub>2</sub>C에서 Weyl 반금속 상의 출현을 발견하였음. 본 연구 결과는 Gd<sub>2</sub>C에서 전자화물 특성, 강자성 및 사소하지 않은 Weyl 밴드 토폴로지의 흥미로운 상호 작용을 확립하였을 뿐만 아니라 2D 적층 강자성 란탄족 탄소화합물에서 토폴로지 Weyl 반금속 위상의 출현의 가능성을 제시함. 본 연구 결과는 물리학 분야 최고의 저널인 Physical Review Letters에 게재됨. (IF: 9.161, 피인용수: 6; 출처 Google Scholar)





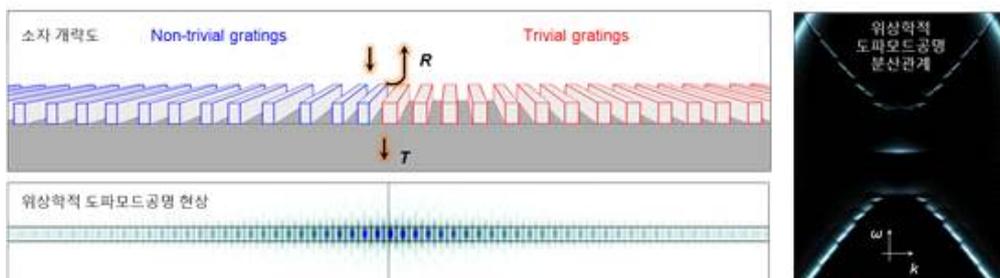
### 금속 수소화물의 고온 초전도 메카니즘 연구 - Scientific Reports (IF 4.379)

포접 구조를 갖는 희토류 금속 수소화물은 고압에서 높은 초전도 전이 온도를 보일 것으로 예측되어 많은 관심을 받고 있음. 최근에 Ce-캡슐화된 포접 H 케이지로 구성된 세륨 수소화물 CeH<sub>9</sub>는 LaH<sub>10</sub> 및 YH<sub>6</sub>과 같은 다른 실험적으로 합성된 희토류 수소화물에 비해 훨씬 낮은 압력 80-100GPa에서 합성되었음. 밀도범함수 이론 계산에 기초하여 우리는 Ce 5p semicore 및 4f/5d 원자가 상태가 H 1s 상태와 강하게 혼성화되는 반면 전자의 이동은 Ce에서 H 원자로 발생한다는 것을 발견하고, Ce 4f 전자의 비편재화 특성이 clathrate H 케이지의 화학적 사전 압축에서 중요한 역할을 한다는 것을 밝혔음. 본 연구 결과는 Ce 원자와 H 케이지 사이의 결합 특성이 이온과 공유결합의 혼합으로 특징지어질 뿐만 아니라 합성에 필요한 더 낮은 압력을 초래하는 향상된 화학적 사전 압축의 기원을 이해하는 데 중요한 의미를 갖는다는 것을 시사함. (IF: 4.379, 피인용수: 1; 출처 Google Scholar)



### 광학적 위상학적 경계 상태 연구 - Nanophotonics (IF 8.449)

위상학적 경계 상태는 서로 위상학적으로 구분되는 밴드갭 물질의 경계에서 발현되는 국소적인 파동임. 이는 최근 응집물질물리계의 화두인 위상학적 절연체, 위상학적 반금속 등에서 발견된 현상으로, 기존의 파동상태와는 달리 물질의 전역적인 특성인 밴드 위상에 의해 보호되며 견고성과 단방향 전파성 등의 파동 수송특성을 지니고 있음. 본 연구에서는 이러한 고체 물성에서 발견된 위상학적 경계 상태를 도파모드공명을 발생시키는 평판형 광-공진격자 소자에서 구현 하는 방법론을 제안하였음. 응집물질과는 달리 누출 손실에 의한 열린계 (비-허미션) 성질을 갖는 평판형 광-공진격자 시스템의 위상학적 상전이 현상과 접합 경계에서 발현되는 위상학적 경계 상태의 발현 원리를 서술하였음. 도파모드공명의 위상학적 경계 상태의 발현을 이용하면 기존의 평판형 광-공진소자 면적의 소형화가 갖는 원리적 한계를 타파할 수 있을 뿐만 아니라 기존 도파모드공명소자 동작의 각도 민감성을 개선하는 원리를 제공함. 또한, 위상학적 경계 상태가 갖는 위상학적 보호 특성에 의해 소자 제작에서 발생하는 국소적인 결함 등에 있어 동작 성능을 견고하게 유지 할 수 있음을 보였음. 따라서 본 연구의 시사점은 열린계 파동 시스템에서 위상학적 경계 상태 발현을 서술하여 새로운 위상 물리 현상을 탐구하는 플랫폼을 제안한 것과 이러한 위상학적 원리가 기존 평판형 광소자에 적용되었을 때 성능 개선과 같은 잠재적 기술 응용 가치를 보였다는 것에 있음.





### 홀로그래피를 이용한 페르미온 스펙트럼 유형 연구 - Journal of High Energy Physics (IF 5.81)

강상관계의 정량적 계산은 지난 세기에 풀지 못한 문제임. 양자상전이점 근방에서의 거시적 물성은 물질의 세부사항에 관계없이 단 몇 개의 유형만이 허용되므로 여기서의 물리학은 단순하리라는 것이 예상됨. 홀로그래피 이론을 이용하여 우리는 여러 가지 대칭성의 붕괴에 따라 생기는 다양한 질서변수의 존재하에서 페르미온 스펙트럼의 유형을 계산하여 분류하였음. 놀랍게도 그 유형은 gap, pseudo-gap, flat disk bands, the Fermi-arc connecting the two Dirac cones of Weyl and Dirac materials, Kondo lattice 등 토폴로지 물질에서 나타나는 것과 동일함을 발견하였음. 이러한 놀라운 현상은 보편성원리에 의해 이해될 수 있음. 즉, 어떤 물질들을 연구해도 토폴로지 물질의 상전이 포인트 근방에서 볼 수 있는 모양과 같은 모양이 나와야 하기 때문임. 이러한 발견에 힘입어 과연 여러 가지 물질에서 일어나는 양자상전이점 부근에서의 페르미온 spectrum이 모두 같은 물리학에 의해 나타날 것인가를 확인하려는 실험물리학자들과의 공동연구를 계획하고 있음.

### ❖ 참여대학원생 연구실적 향상 계획

- BK 세미나 지속적 운영
- BK 연구성과 발표회 개최
- 우수 논문 선정 및 성과급 지급
- 해외 우수 연구 기관과의 공동 연구 및 인적 교류 활성화
- 극한물성 연구분야 국제 계절학교 개최
- 산학협력을 통한 응용연구 활성화

- BK 세미나 지속적인 운영  
BK 세미나시리즈를 진행함으로써 참여대학원생들은 양자물질 극한물성 분야의 주요 연구 주제와 최신 연구 결과를 습득할 수 있었음. 본 교육 연구팀은 참여대학원생의 연구력 향상을 위해 BK 사업 기간 동안 극한물성분야 국내외 전문가를 초빙하여 정기 세미나를 지속적으로 운영할 것임.
- 매학기 BK 연구성과 발표회 개최  
본 교육연구팀은 참여대학원생의 연구력 제고를 위해 매학기 참여대학원생들의 연구성과 발표회를 진행하고 있음. 2020년 2학기 성과발표회는 2021년 1월 28일에, 2021년 1학기 성과발표회는 2021년 7월 30일에 진행하였음. 본 교육연구팀은 BK 사업 기간 동안 참여대학원생을 대상으로 연구성과 발표회를 지속적으로 개최할 것임.
- 매학기 우수 논문 선정 및 성과급 지급  
참여대학원생들의 연구 의욕 고취를 위해 매학기 학술활동 실적을 자체 평가하여 우수 논문을 선정하였음. 해당 학기에 IF가 3이상인 논문을 주저자로 발표한 참여대학원생에 대한 자체 평가를 통해 최우수상 1명, 우수상 1명, 장려상 2명을 선정하여 교육연구팀장 명의의 상장을 수여하였음. 성과급으로 최우수상 수상자에게는 50만원, 우수상 수상자에게는 40만원, 장려상 수상자에게는 30만원을 지급하였음. 본 교육연구팀은 BK 사업 기간 동안 참여대학원생의 학술활동 실적에 대한 평가, 우수 참여대학원생에 대한 상장 수여 및 성과급 지급을 지속적으로 시행할 것임.
- 해외 우수 연구 기관과의 공동 연구 및 인적 교류 활성화  
첨단 연구를 선도하고 있는 미국, 유럽, 일본과 현재 선도 국가로 부상하고 있는 중국 대학 및 연구기관과의 공동 연구를 통하여 세계 수준의 연구 결과를 발표할 것임. 해외 우수 연구진과의 공동 연구 및 교류를 통해 새로운 연구 주제 개척, 국내에서 접근이 불가능한 연구시설 이용, 최신 연구 정보의 교환 등을 도모하여 연구의 질 향상을 달성할 것임.

## ② 참여대학원생 학술대회 대표실적의 우수성



### (2021 APS March Meeting 구두 발표)

- 발표 논문: Ferromagnetic Weyl Fermions in Two-Dimensional Layered Electride  $Gd_2C$

- 발표 내용: 2차원 적층 전자화물  $Gd_2C$ 에서 강자성

Weyl 페르미온을 제시하는 구두 강연임. 2D 층상 전자화물은 일부 과잉 전자가 양전하를 띤 양이온 층 사이의 틈새 공간에 존재하는 새로운 종류의

비전통적인 이온 화합물로서 매우 매력적인 물질임.

유서원 박사과정 학생은 독특한 2D 적층 강자성

전자화물  $Gd_2C$ 에서 시간 역전 대칭을 깨는 Weyl

반금속 상을 연구했음. 결정장이 페르미 에너지

근처에서 격자간 전자 상태와 Gd-5d 오비탈을 혼합하여 밴드 역전을 유도하는 것을 밝힘. 또한, Weyl

노드를 연결하는 Fermi-arc 표면 상태를 식별할 뿐만 아니라 큰 고유한 비정상적인 홀 전도도를 예측

함. 학생은 2021년 APS 3월 미국물리학회에서 연구 결과를 구두 발표를 했으며 이를 정리하여

물리학 분야 최고 저널인 Physical Review Letters 에 게재하였음.



### (2021 APS March Meeting 구두 발표)

- 발표 논문: Stability and superconductivity of compressed superhydride  $CeH_9$  with Dirac-nodal-line fermions

- 발표 내용: Dirac-nodal-line 페르미온을 사용하는

압축된 초수소화물  $CeH_9$ 의 안정성과 초전도성을

소개하는 구두 강연. Chongze Wang 박사과정 학생은

결정 대칭에 의해 보존되는 페르미 에너지 주위에

위상학적으로 중요한 Dirac 노드 라인을 생성하기

위해 Ce-4f 및 H-1s 오비탈의 전자 상태가 강력하게

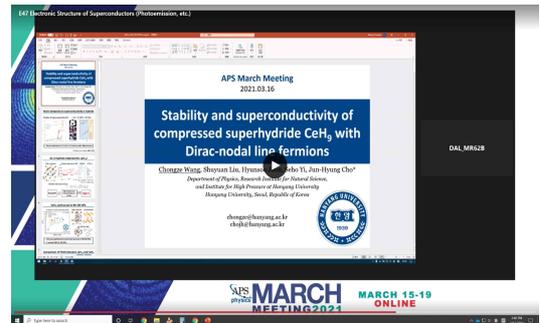
혼성화되어 있음을 밝혔음. 정공 도핑에 의해 페르미

에너지는 대칭에 의해 유도된 반 호브 특이점 쪽 아래로 이동하여 상태 밀도를 증가시키고, 이는 차례

로 초전도 전이 온도를 크게 상승시킴.

학생은 이 연구 결과를 2021년 3월 미국물리학

회에서 구두로 발표했으며, 이 연구 결과를 Physical Review B 저널에 게재하였음.



### (2021 APS March Meeting 구두 발표)

- 발표 논문: Pressure-induced the Purification of  $Cs_4PbBr_6$  Impurity

- 발표 내용: 광전자 응용 분야로 인해 큰 관심을 받아온 납

할로겐화물 페로브스카이트 일종인  $Cs_4PbBr_6$ 에 다이아몬드

엔빌셀을 이용한 약간의 압력 (~20 GPa)을 가하여  $CsPbBr_3$

불순물을 95%까지 제거하여 정제할 수 있음을 밝혔고,

본 결과를 2021년 3월 미국물리학회에서 구두로 발표했으며

The Journal of Physical Chemistry C (IF: 4.189)에 게재 함.

본 연구결과는 국제공동연구의 일환으로 중국 HPSTAR

소속인 교수팀과 수행하였음.





### (2021 한국물리학회 봄학술논문발표회 포스터 발표, 우수 발표상 수상)

- 발표 논문: Evolution of electronic structure in the bilayered perovskite  $\text{Sr}_3(\text{Ir}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{O}_7$
- 발표 내용: 스핀-궤도 결합이 강한 이리듐 산화물의 전자구조에 망간 도핑이 미치는 영향 연구 결과를 발표하였음. 층상 페로브스카이트 구조를 가지는  $\text{Sr}_3\text{Ir}_2\text{O}_7$ 은 전자 상호 작용과 강한 스핀-궤도 결합에 의해 유도되는 총각운동량 1/2 모트 절연체임. 이 물질은 고온 초전도체 구리 산화물과 같은 결정 구조와 자성 상태를 가져, 전하 도핑에 의해 새로운 고온 초전도 상태를 발견할 수 있을 것이라는 기대감으로 인해 많은 관심을 받고 있음. 김동욱 학생은 Mn 이온이 도핑된  $\text{Sr}_3\text{Ir}_2\text{O}_7$ 의 전자구조를 적외선 분광 실험법을 이용하여 연구하였음. Mn 도핑은 계에 정공을 도핑할 뿐만 아니라, 이 물질의 기저 상태 형성에 결정적인 영향을 주는 스핀-궤도 결합의 크기도 바꿀 것으로 기대되었음. 김동욱 학생은 Mn 도핑 증가에 따른 전자 구조 변화를 체계적으로 연구하여 Mn 이온이 도핑되면, 계에 정공이 나타나지만 스핀-궤도 결합의 크기가 거의 변하지 않음을 발견하였음. 또한,  $\text{Sr}_3(\text{Ir},\text{Mn})_2\text{O}_7$ 의 광전도도를 분석하여 Mn 이온 도핑의 효과가 단순히 정공 도핑에 국한되지 않고 Mn 이온에 의한 새로운 전자 상태를 유도함을 발견하였음. 학생은 이 연구 결과를 종합하여 2021년 한국물리학회 봄학술논문발표회에서 포스터 발표를 하였으며, 우수 발표상을 수상하였음.



### (2021년 춘계학술대회-한국반도체디스플레이기술학회 포스터 발표, 우수 발표상 수상)

- 발표 논문: Amorphous carbon oxide bipolar resistive switches integrated by stacked ultrathin Cu-layer
- 발표 내용: a-COx 기반 ReRAM을 통한 forming free 특성 구현 연구. ReRAM은 DRAM의 신속한 동작 속도와 flash memory의 비휘발성을 동시에 가지는 차세대 메모리로 PRAM, MRAM과 함께 연구되고 있음. 기본적인 구조는 metal-insulator-metal 2Terminal로 제작되어 간단하게 fabrication이 가능하고 집적도에 유리함. 양단에 전압을 걸어주면 insulator의 저항상태를 조절할 수 있고, 그에 해당하는 메카니즘은 여러 가지가 있음. 그 중 많이 보고되고 있는 filament type과 interface type이 있음. Filament type은 oxygen vacancy나 metal ion들이 전기장에 의해 drift 하면서 insulator 내부에 전도성 path를 형성하고 전기장의 방향이나 크기에 따라 path의 전도성이 바뀌어 소자의 저항상태를 조절할 수 있는 type임. 이 타입은 초기에 이러한 path를 형성하는 forming 과정이 필수적임. 이 연구 결과를 종합하여 포스터 발표를 하였으며, 우수 발표상을 수상하였음.



### (2021년 춘계학술대회-한국반도체디스플레이기술학회 포스터 발표, 우수 발표상 수상)

- 발표 논문: Determination of spin orbit torque efficiency of novel A15 phase  $\text{W}_3\text{Ta}$  heavy metal
- 발표 내용: Heavy metal / Ferromagnet / Oxide 의 이형접합구조에서 Heavy metal 을 A15 phase 구조의  $\text{W}_3\text{Ta}$ 를 이용한 Spin orbit torque (SOT) 측정결과 포스터발표. SOT를 이용한 이형접합구조에서 SOT의 크기를 결정하는 것은 물질 내 흐르는 전류가 spin orbit coupling 에 의해 spin current 로 얼마나 전환되느냐와 관련이 있음. 이는 spin hall angle로 인가된 전하대비 스핀전류의 전환비율로 나타남. 이번 연구에서는 기존의 A15 phase의 W과 이론적으로 제안된  $\text{W}_3\text{Ta}$  합금의 SOT의 크기를 측정하였음.  $\text{W}_3\text{Ta}$ 는 A15 phase일 때, 기존의 W에 비해 약 2배 정도의 큰 SOT를 가지는 것을 이론논문에서 발표되었음. RF sputtering을 이용해 특정한 조건에서  $\text{W}_3\text{Ta}$ 는 alpha phase에서 A15 phase 를 형성하게 됨. 이 결정구조가 나타나는 조건에서 Heavy metal / Ferromagnet / Oxide의 이형접합구조에서 perpendicular magnetic anisotropy가 나타나는지 vibrating sensing magnetometer를 이용하여 확인하였음. 이후 crossbar array 공정을 통해  $\text{W}_3\text{Ta}$ 가 기존의 W 보다 SOT 의 크기가 큰 것을 확인하였음. 이러한  $\text{W}_3\text{Ta}$  물질의 특성을 이용하여 저전력으로 구동이 가능한 spintronic device로의 응용이 가능함을 21년 한국반도체디스플레이 기술학회에서 포스터 발표를 하였고, 우수논문상을 수상하였음.

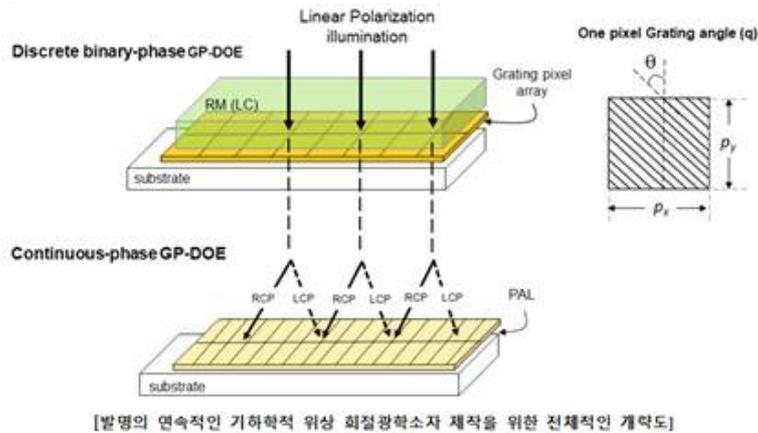
### ③ 참여대학원생 특허, 기술이전, 창업 실적의 우수성

#### ❖ 참여대학원생 특허 실적 우수성



불연속적인 기하학적 위상 회절광학소자로부터 연속적인 기하학적 위상 회절광학소자를 제조하는 방법에 관한 특허 [등록번호 10-0188729]

- 본 발명은 대량복제 가능한 연속적인 기하학적 위상 회절광학소자(Geometric-phase Diffractive Optical Element)의 제작방법에 관한 것임. 회절격자배열(grating pixel array)에 비등방성 물질을 코팅하여 제작한 저분해능의 불연속적인 기하학적 위상 회절광학소자를 좌원, 우원으로 편광된 빔이 간섭함에 따라 발생하는 편광패턴을 통해 위상 자유도가 높고 향상된 분해능을 가지는 연속적인 기하학적 위상 회절광학소자를 제작하는 기술임. 존의 기하학적 위상회절 광학소자기술과 비교하여 보다 높은 자유도의 위상 분포와 높은 생산성을 동시에 확보하였음.



#### ❖ 참여대학원생 특허 실적 향상 계획

- 1차년도에 참여대학원생 특허 1건: 2017 - 19 기간 참여대학원생 특허 실적 (3건)과 동일한 수준
- 산학협력 응용연구를 통한 특허실적 향상 계획  
대학에서 발생한 연구 성과를 산업체 응용 연구나 기술 개발에 적용함으로써 새로운 연구 주제를 개척할 수 있고 참여 대학원생들에게는 향후 진로 모색을 위한 중요한 기회를 제공할 수 있을 것임. 본 교육연구팀은 대학원생 연구 역량 제고와 취업의 질 향상을 위해 산업체와의 교류 기회를 마련하고자 함. 산학협력 활성화를 위해 본 교육연구팀은 아래와 같은 구체적인 방안을 추진할 것임.
- 산학 공동 워크숍 개최 및 참석: 본 교육 연구팀 참여교수들은 삼성전자, 삼성디스플레이, LG디스플레이 등의 산업체와 공동 연구를 수행중임. 산학 공동 연구 수행 결과를 공유하고 활용하기 위해 산업체와의 공동 워크숍을 진행하여 특허와 기술이전 및 사업화의 중요성을 인식시킬 예정임.
- 특허 전문가 초빙 교육: 수행한 연구결과로부터 논문, 특허, 기술실시계약으로 이어지는 전주기적 성과를 달성하기 위해 특허 전문가를 초빙하여 특허의 중요성과 작성 방법에 대한 교육을 실시할 예정임.

## 4. 신진연구인력 현황 및 실적

### ❖ 1차년도 신진연구인력 현황 및 실적

본 교육연구팀은 1차년도에 본교 물리학과 대학원에서 박사학위를 취득한 안기현 박사를 신진연구인력으로 채용하였음.

- 박사

채용기간: 2020년 11월 1일 - 2021년 8월 31일

연구주제: Optical spectroscopy study on correlated electron materials

연구실: 응집물질분광 연구실 (문순재 교수)

연구논문: 스핀-궤도 결합과 전자 상호 작용이 존재하는 이리듐 산화물의 금속-비금속 전이에 대한 연구를 수행하여 한 편의 주저자 논문을 발표하였음.

Doping and temperature evolution of optical response of  $Sr_3(Ir_{1-x}Ru_x)_2O_7$ ,  
, Sci. Rep. **10**, 22340 (2020).

박사는 Ru이 치환된  $Sr_3Ir_2O_7$ 의 도핑과 온도에 따른 광전도도 변화를 광분광 실험을 이용하여 연구하였음. 이 연구를 통해 Ru 치환에 의한 비금속-금속 상전이가 percolation 현상으로 설명된다는 점과 금속-비금속 전이의 경계에 있는 물질에서 강한 전하-격자-스핀 상호 작용을 발견하였음.

학술대회발표:

- 한국물리학회 가을 학술논문발표회 구두발표 (2020. 11. 4-6): Infrared observation of the low-energy interband transition in ultraclean  $SrVO_3$  film

- 한국초전도학회 동계학술대회 (2021. 2. 24-25) 포스터 발표 및 우수 논문상 수상: Doping and temperature evolutions of optical response of  $Sr_3(Ir_{1-x}Ru_x)_2O_7$

### ❖ 신진연구인력 운영 계획

- 본 교육연구팀은 개별연구실과 교육연구팀이 인건비를 분담하여 최대한 많은 신진연구인력을 확보하는 방안을 시도하였으나, 이는 BK 규정상 허용되지 않았음. 코로나로 인해 해외학술활동이 제한적으로 이루어지고 있는 상황을 고려하여 차년도에는 국외여비를 신진연구인력 추가확보를 위한 인건비로 전용하기로 함.
- 현재 국제 공동연구를 수행하고 있는 연구기관과의 교류를 통한 극한 물성 분야 우수 신진연구인력 추가 확보
  - 국제 수준의 첨단 기초 및 실용 물리 연구를 위해서는 우수한 신진연구인력 확보가 필수적임.
  - 본 교육연구팀은 국제 공동연구 네트워크를 적극 활용하여 공동 연구를 수행하고 있는 해외 연구실 출신의 박사학위 소지자를 교육연구팀의 신진연구인력으로 유치하여 우수 신진연구인력을 확보하고 공동연구의 연속성을 유지할 것임.
  - 현재 MoU를 체결한 기관들로부터 우수한 인적자원을 선발할 계획임. 허난사범대학교, 린이(Lynyi)대학교, 길림대학교, 북경고압연구센터, 연산대학 (Yanshan University)이 그 대상임.
  - 실제로, 김재용 교수는 현재 MoU를 체결한 길림대학교에서 최근 학위를 취득한 박사를 신진연구인력으로 확보하였음 (2021년 10월 1일 자 발령 예정), 또한 Lynyi대학교 출신 연구원이 2022-1학기 본 학과 석박통합과정으로 입학할 예정임.
- 우수 신진연구인력 확보
  - 교육연구팀의 연구 능력 향상을 위해 길림대학교 물리학과에서 고압연구를 전공한 연구원과 고려대학교 물리학과에서 응집물리전공으로 박사학위를 취득하고 성균관대학교에서 박사후 연구원을 지낸 연구원을 신진연구인력으로 채용할 예정임.

- 박사  
채용기간: 2021년 10월 1일 - 2022년 9월 30일  
연구주제: Studies of superhydrides under high pressure and high temperature.  
연구실: 고압물리연구실 (김재용 교수)

- 박사  
채용기간: 2021년 10월 1일 - 2022년 9월 30일  
연구주제: Synthesis and characterizations of Type II Dirac Semimetals  
연구실: 반도체나노광학연구실 (정문석 교수)

## 5. 참여교수의 교육역량 대표실적

- 광학설계실습 (송석호 교수): 이론과목을 통하여 습득한 지식을 실제 응용에 적용하기 위한 실습 위주의 수업을 진행함으로써, 첨단 물리학적 지식의 활용성에 대한 안목을 넓히고, 새로운 가치를 창출할 수 있는 경험을 하도록 하였음. 파장보다 작은 극한광학계에서 일어나는 다양한 공명 현상들을 깊이 있게 이해하기 위해, 파동광학 (wave-optics) 및 회절광학 (diffractive optics) 위주로 광학 시뮬레이션에 대한 지식을 실습을 통하여 습득하도록 하였음.
- 강상관계 1 (신상진 교수): 끈이론의 열린 끈과 닫힌 끈 사이의 상대성을 이용하면 강한 상호작용 하는 물질계의 동역학을 고전적 리만 기하학 이론으로 기술할 수 있음. 이러한 원리를 전자계에 적용하여 풀리지 않는 다체 물리학에 획기적인 발전을 가져오하고자 하는 것이 최근 끈이론의 중요한 이슈임. 본 과목에서는 학생들의 발표와 박사후 연구원 및 외부초청연사의 강의를 통해 이 분야의 가장 중요한 아이디어를 습득하고 최신동향을 파악하도록 수업을 구성하고, 2021년 1학기에 진행되었음.
- 다체계및위상물리 1 / 위상물리 2 (천상모 교수): 최근 양자위상물질에 대해 많은 연구가 진행되고 있음. 다체계 물리, 위상 절연체 및 초전도 물리에 대해 소개하여 이론을 전공하는 학생 뿐 아니라 실험을 전공하는 학생도 수강도 할 수 있도록 교과목이 개발되었음. 각각 2020년 2학기 와 2021년 1학기에 진행되었음.

## 6. 교육의 국제화 전략

### ① 교육 프로그램의 국제화 현황 및 계획

#### ◆ 교육 프로그램의 국제화 현황 및 계획

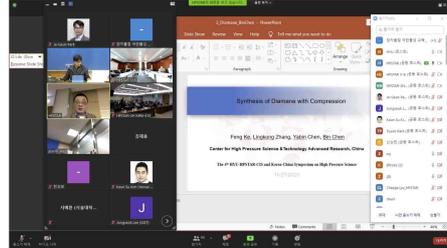
#### 📖 교육 프로그램의 국제화 현황

모두가 경험하고 있듯이 2020년에는 코로나-19 영향으로 기대치만큼 직접적인 국제교류가 활성화되지 못하였음. 하지만 Zoom을 비롯한 다양한 화상연결을 이용하여 비대면 방식으로 세미나 및 교육 및 연구를 꾸준히 진행하였고 결과는 다음과 같음.

- 중국 HPSTAR 소속 , 교수, 교수, Yanshan University 소속 교수 등 해외 우수학자들을 본교 특임교수, 겸임교수로 발령하여 대학원생 논문, 연구활동을 지도함.
- 중국 연산대학교 (Yanshan University) 의 교수를 본 학과의 겸임교수로 발령하여 대학원생들의 연구를 공동지도하고 있으며, 학생 공동연구 지도결과를 전문학술지 Carbon에 투고함 (2021.06.28.).
- 중국 연산대학교 (Yanshan University) 이과대학 (School of Science)와 연구와 학생교류 내용으로 MoU를 체결함 (2021.01.04).
- MoU 체결기관인 중국 HPSTAR소속 박사가 브레인풀 사업에 선정 (국내 책임자: 김재용교수) 되었으나 코로나-19 사태로 국내체류를 취소하고 대신 온라인으로 대학원생 공동지도 ( 학생과의 potassium hydride 관련 연구) 및 공동연구를 수행함.

## 국제 학회 개최

- The 1<sup>st</sup> Workshop on Quantum Material under Extreme Conditions 개최함 (2020. 11. 27.).
- 다양한 양자 물질이 초저온 또는 초고압 상태에서 보이는 새로운 물성에 대한 연구 결과를 발표하고 공동 연구 아이디어를 논의함.
- 한국과 중국의 초청연사 11명, 줌 온라인 참가자 약 250여명 (한국측 100여명, 중국 베이징/상하이 고압연구소 현장 참여 약 150명).



- 본 학회는 매년 또는 격년으로 양자물질 극한물성 분야의 국제 학술대회를 조직하고 운영함.
- 양자물질 극한물성 연구는 현재 새롭게 태동하고 있는 분야임. 해당 분야에 대한 질 높은 교육 및 연구를 수행하기 위하여 국내외 연구자들과의 연구 성과 및 노하우 교류가 절대적으로 필요함. 이를 위해 본 교육연구팀은 양자물질 극한물성 분야의 국제 학술대회를 지속적으로 개최하고 있음.
- 참고로, 본 교육연구팀 참여교수들은 2021년 11월 21일부터 11월 25일까지 10th Asian Conference on High Pressure Research 학회를 유치하였음. 본 국제학술대회는 19th International Conference on High Pressure Semiconductor Physics와 3rd International Workshop on High Pressure Study on Superconductors와 연계하여 진행됨. 김재용 교수가 조직위원장을 맡고 있으며, 조준형 교수, 문순재 교수, 천상모 교수가 조직위원으로 활동 중임. 본 국제학술대회를 통해서 대학원생들의 연구 결과를 발표하는 기회를 부여하여 해외 저명학자들과의 교류와 영어발표의 기회를 제공할 것임.

## 교육 프로그램의 국제화 계획

- 본 교육연구팀은 극한물성 연구를 세계에서 가장 첨단으로 수행하는 중국북경고압연구소와 길림대학 등을 비롯한 6개국 10여개 기관들과 연구와 교육면에서 전략적 파트너십을 수립하여 국제화를 추진하고 있음.
- 해외연구기관소속 학자들의 본 학과 겸임교수 발령을 통하여 대학원생들의 연구공동지도, 학위공동논문문서, 국제화 컨설팅 관련 자문을 지속적으로 유지할 것임.
- MoU 협정체결 기관들과의 국제협력 계획
  - 중국 길림대학 (Jilin University)의 State Key Laboratory of Superhard Materials 소속 박사를 본 연구팀 신진연구 인력으로 채용하여 (2021. 10월 1일자 발령 예정) 길림대학교와의 국제교류원으로 활용할 예정임.
  - Yanshan 대학교의 교수 연구실의 대학원생을 김재용교수 연구실에 파견하여 공동연구를 수행할 예정이며, 학위취득 후 신진연구 인력으로 활용할 예정임.
  - MoU기반 중국의 우수대학원생을 본 학과 대학원생으로 유치하여 국내연구 인력의 공백을 대신할 수 있도록 할 예정임.
- 2021년 10월 Fudan University, Feng Chia University (대만) 들을 연계한 공동심포지엄 추진
- 2차년도에는 중국뿐 아니라 인도 (소장) 와도 MoU체결을 통한 인력교류를 계획하고 있음.

## ② 참여대학원생 국제공동연구 현황과 계획

### ❖ 참여대학원생 국제공동연구 실적

<표 2-15> 참여대학원생의 국제공동연구 실적

연번	공동연구 참여자			상대국 /소속기관	국제 공동연구 실적	증빙
	참여 교수	참여 대학원생	국의 공동연구자			
1		김재용		중국/Yanshan University	Distance makes a difference in crystalline photoluminescence	10.1038/s41467-020-19377-6
2		김재용		중국/Yanshan University	2021.1.27. - 2. 23. (28일) 동안 Yanshan University 장기 연수: 다이아몬드 앤빌셀을 이용한 C60 m-xylene의 초고압에서의 물성연구. 연구 결과 Carbon지에 투고.	
3		조준형		폴란드/Czechoslovakia University of Technology	LaH <sub>10</sub> 의 초전도성의 수소 동위원소의 영향에 대한 제일원리 연구	10.1002/andp.202000518
4		조준형		중국/허난대학교	이차원 전자화물에서의 강자성 바일 페르미온 연구	10.1103/PhysRevLett.125.187203
5		조준형		중국/후단대학교, 중국과학기술대학	반강자성 카고메 격자에서의 디락 페르미온 연구	10.1103/PhysRevB.102.155103

김재용 교수연구실의 학생은 고압물성연구관련 해외공동연구자인 박사 (중국 HPSTAR, Yanshan University)연구실을 2021.1월 27일부터 2월 23까지 28일 동안 장기 방문하여 다이아몬드 앤빌셀을 이용한 C60 m-xylene의 초고압에서의 물성연구를 수행하였음. 플러린으로 이루어진 C60의 압력과 온도에 따른 전기전도도와 구조변화를 측정함으로써 M-SM전환을 확인하였고, 특히 동일한 조건에서도 앤빌셀의 위치에 따라 압력이 균일하지 않음을 C60시료의 TEM 분석을 직접 진행하였고 이러한 결과를 종합하여 Carbon에 투고하였음.



Center for High Pressure Science (CHPS)  
State Key Laboratory of Mesoscopic Materials Science and Technology  
Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China  
December 8, 2020

Li Wang, Ph. D.  
Department of physics, Hanyang University  
222 Wangangmiao, Seongdong-gu  
Seoul, 04763, Korea

Dear Prof. Kim,

I am writing to invite Zhongyan Wu, a Ph.D candidate in your laboratory to work in my laboratory for joint research on fullerenes structure under high pressure from January 12, 2021 - February 23, 2021. My laboratory specializes in the technology of high pressure to study the structure of sustainable materials. As Mr. Wu has experience in DAC tools for high pressure and fullerenes-based materials, our collaboration will be mutually beneficial.

Specifically, my laboratory is currently equipped with the following devices: FT-IR and Raman spectroscopy, SEM and TEM, gas loading system, and diamond anvil cell tools for high pressure. I will be able to support the laboratory equipment need for this joint research under high pressure. Also I agree to Mr. Wu's plan for the first 6 weeks as described below:

- 1<sup>st</sup>~2<sup>nd</sup> week: COVID-19 quarantine
- 3<sup>rd</sup> week: Discuss with the researchers for arranging the following experiment steps and do FTIR spectra extraction for sample preparations.
- 4<sup>th</sup>~5<sup>th</sup> week: TEM equipment for the prepared samples
- 6<sup>th</sup> week: Analyze and discuss with researchers for a further study based on the results

I understand that Mr. Wu's expenses during his stay in our laboratory will be provided by the Brain Korea Program of Hanyang University. As a co-advisor of Mr. Wu for his Ph. D degree, I will support his research during his stay in my lab. Please let me know if there is anything else that I can do.

Most sincerely,

Li Wang, Ph. D.  
Center for High Pressure Science (CHPS)  
Yanshan University, China



[ 학생의 Yanshan 대학 장기 연수 및 실험 수행 내용 ]

김재용 교수연구실의 학생은 미국 Argonne National Laboratory에 위치한 Advanced Photons Source (APS)의 13-BMC과 16BMD 빔라인 Proposal 에 4차례 선정되어 K-H 시스템의 구조분석에 관한 실험을 수행하였음. 참고로 최근 COVID-19 사태로 미국국립연구소의 출입이 허락되지 않는 상황에서 시료를 미리 우편으로 보내고 대신 본 연구실에서 원격으로 실험을 수행. 미국(시카고)과의 시차를 고려하면 데이터 측정에 제한적이긴 하였지만, 시간과 비용을 절감하였고, 현 상황에서 최소한의 결과를 취득할 수 있었음. Proposal 내용과 빔타임배정 및 실험일정은 다음과 같음.

BM Start Date	BM End Date	Beamline	Experiment ID	Proposal ID	Title
08/10/2020	08/12/2020	13-BMC	229795 (GUP)	70300	High pressure structural studies of titanium zirconium alloy aiming at hydrogen absorption properties
11/11/2020	11/13/2020	13-BMC	233488 (GUP)	71761	Modulation of metal-insulator transition in hydrogen-doped vanadium oxides under pressure
02/04/2021	02/06/2021	13-BMC	235804 (GUP)	72548	Polymerization of Nitrogen in NH4N3+N2 at High Pressures
03/23/2021	03/25/2021	16-BMD	235805 (GUP)	70293	Structural studies of lithium-doped magnesium hydrides under extremely high pressure
07/27/2021	07/29/2021	13-BMC	244483 (GUP)	74216	Synthesis and Structural Study of Polynitrogen in Ammonium Azide and Nitrogen under High Pressure

### APS ESAF - Experiment Hazard Control Plan Report

Printed date: 09/04/2021

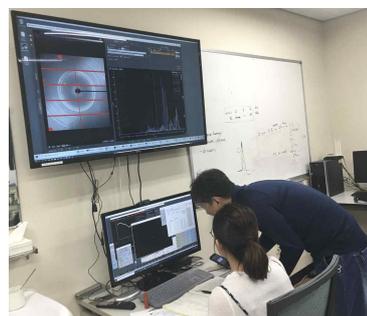
<b>PEN:</b> 13-BMC-2021-5	<b>Experiment ID:</b> 235804 (GUP)
<b>BM Start Date:</b> 02/04/2021 09:00 AM	<b>BM End Date:</b> 02/06/2021 06:00 AM
<b>Spokesperson:</b> Yan	<b>GUP ID:</b> 72548
<b>Title:</b> Polymerization of Nitrogen in NH4N3+N2 at High Pressures	

#### Spokesperson

The information on this hazard control plan is accurate and complete. All materials/samples to be used and hazards have been identified. All users are listed. Activities are restricted to the scope of work declared in the ESAF.

Name	Institution	Phone
Jiafeng Yan	Hanyang University	+821025071722

As the designated spokesperson for the experiment I acknowledge that the above statement is true. This is an electronic signature



### ❖ 향후 추진 계획

- 중국과 동남아국가들과의 국제공동연구를 확대하기 위하여 Fudan University (중국), Feng Chia University (대만) 등과 3자 공동심포지엄 기획 중 (2021.11월 개최 예정)
- 학생들 해외공동연구기관 장기파견을 통한 중장기 연구수행
- 참여대학원생들 해외 저명학회 구두발표 지속적 지원
- MoU 추가 체결 기반 국제공동연구 다양화 추진
- 해외방문 후 자가격리가 해제되는 상황이 만족되는 즉시, 매년 2명 이상의 대학원생을 중국, 미국 등 해외기관에 15일 이상 파견하여 국제공동연구를 추진 및 결과물 국제학술지 투고.

### III

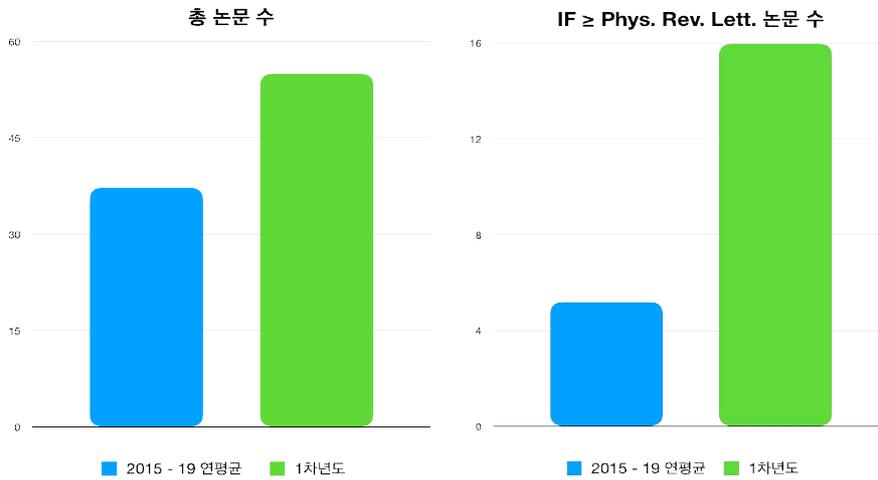
## 연구역량 영역

#### □ 연구역량 대표 우수성과

#### ❖ 참여교수 논문실적

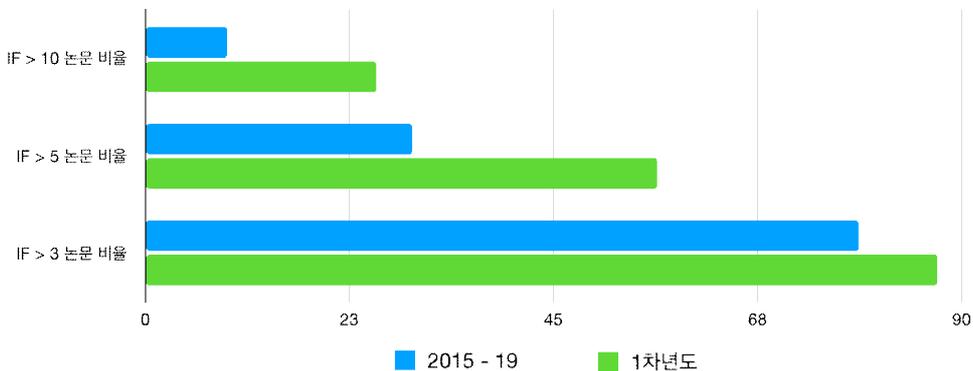
- 🎯 1차년도 참여교수들의 발표논문 55편, IF 합 485.626
- 🎯 IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수 16
- 🎯 IF > 10.0 논문수: 14편 (25.5%), IF > 5.0 논문 수: 31 (56.4%), IF > 3.0 논문 수: 48 (87.3%)

- 총 논문 수: 2015 - 2019년 논문 수 연평균 (37편) 대비 **48% 증가**
- IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수: 2015 - 19 연평균 대비 **207% 증가**



#### • 우수 논문 비율

- IF > 10 논문 비율: 2015 - 2019년 대비 **183% 증가**
- IF > 5 논문 비율: 2015 - 2019년 대비 **92% 증가**. 목표치 (≥ 40%) 초과
- IF > 3 논문 비율: 2015 - 2019년 대비 **11% 증가**



• 대표 연구 성과

- 2차원 전자화물에서 강자성 Weyl 반금속 상태 발견: Phys. Rev. Lett. 125, 187203 (2020) (IF 9.161)  
 2차원 층상 전자화물은 양이온 층 사이의 틈새 공간에 음이온 전자를 보유하는 새로운 종류의 물질로 등장. 우리는 독특한 2차원 적층 강자성(FM) 전자화물 Gd<sub>2</sub>C에서 시간 역전 대칭을 깨는 Weyl 반금속 상을 발견했으며, 강자성 상은 스핀-궤도 결합을 통해 여러 쌍의 Weyl 노드로 변환되는 두 개의 스핀성 Weyl 노드 라인을 유도함. 또한 Weyl 노드를 연결하는 Fermi-arc 표면 상태와 강한 비정상 홀 전도도를 예측함. 본 연구 결과는 실온에서 강자성 전자화물 Gd<sub>2</sub>C에 Weyl 페르미온의 존재를 보여줌으로써 전자화물 물질과 자기 Weyl 물리학 간의 흥미로운 상호 작용을 조사하기 위한 새로운 플랫폼을 제공할 것으로 기대됨.

- 유기 태양 전지에서 전하 재활용 메커니즘 규명: ACS Energy Letters 6, 2610 (2021) (IF 23.101)  
 PC<sub>71</sub>BM과 비풀러렌 수용체[non-fullerene-acceptor(NFA, ITIC)]가 포함된 충전-발전 메커니즘 내부 혼합 유기 태양전지[organic solar cells (OSCs)]에 미치는 푸시풀 결합 중합체[conjugated polymer (CP)]의 측면군 및 백본 확장 효과를 조사하였음. 과도 흡수 분광학적 결과에 따르면 CP 확장이 ITIC에서 CP로 가는 홀 전달효율을 증가시켰고, 미세하게 혼합된 구조로 인해 트리플릿 전하-전달 상태, 3CT를 통한 nongeminate 재조합에 의한 삼중수소(T1)의 형성을 유도하였음. 특히 T1 exciton에 대한 3CT 상태 이완은 사이드 그룹 및 백본 확장 CP를 기반으로 한 3차 혼합 필름에서 PC<sub>71</sub>BM에 의해 효율적으로 완화되었음. 이로 인해 ITIC에서 CP로 정공이 전이되어 생성된 자유 캐리어가 재활용되어 최적화된 3중 혼합 형태론을 갖는 유기 태양전지의 효율성이 높아졌음. 본 연구 결과는 NFAs에서 CP로 광유도 정공 전송을 통해 전하생성 메커니즘에 대한 새로운 시각을 보여줄 것으로 예상됨.

❖ 참여교수 연구비 수주실적

<표 3-1> 참여교수 연구비 수주 실적

	1차년도	2015-19 연평균
연구비 총액 (천원)	3,721,926	1,970,844
1인당 연구비 (천원)	413,547	281,549

- 1차년도 연구비 총액 3,721,926,267원, 참여교수 1인당 연구비 413,547,363원
- 2017-2019년 연평균 연구비 대비 연구비 총액 82%증가, 1인당 연구비 총액 42% 증가
- 해외 연구비 수주: 미국 공군 (Asian Office of Aerospace Research and Development)
  - 연구주제: Quantitative Prediction of the Electrical Properties with Optical Measurement via Deep Neural Networks
  - 본 교육연구팀의 참여교수인 정문석 교수가 미공군연구소로부터 우수 평가를 받아 수주한 과제이며 인공지능을 이용하여 광특성 분석결과로부터 전기적인 특성을 예측하는 연구임.

❖ 참여교수 특허실적

<표 3-2> 참여교수 특허 실적

	1차년도	2015-19
국제특허 (건)	5	5
국내특허 (건)	5	2

## ❖ 참여교수 국제 학술활동 실적

- 1차년도 국제 공동 연구를 통한 SCI 논문 13편 발표
- 국제학회 조직위원 8건, 국제학술지 편집위원 3건
- The 1<sup>st</sup> Workshop on Quantum Material under Extreme Conditions 개최 (2020. 11. 27.)
  - 극한 환경에서 양자물질이 보이는 물성 연구에 대한 워크샵 개최
  - 한양대학교 양자물질 극한물성 교육연구팀, 중국 HPSTAR, 미국 카네기 연구소가 주관하는 The 4<sup>th</sup> HYU-HPSTAR-CIS and Korea-China Symposium on High Pressure와 결합하여 개최
  - 국내 초청 연사 6명, 중국 초청 연사 5명 발표
  - 줌 온라인 참가자 약 100명, 중국 베이징/상하이 고압연구소 현장 참여 약 100명
  - 다양한 양자 물질이 초저온 또는 초고압 상태에서 보이는 새로운 물성에 대한 연구 결과 발표 및 공동 연구 아이디어 논의



- 김재용 교수 연구실 중국 Yanshan University, 교수 연구실과의 공동 연구
  - 2021년 1월부터 2021년 2월까지, 중국 Yanshan University의 교수와 압력 관련 연구방향 설정 및 학과 연구방향 컨설팅 진행
  - 학생 장기 연수 (2021. 1. 27 - 2. 23.): 다이아몬드 앤빌셀을 이용한 C60 m-xylene의 초고압에서의 물성연구 수행. 연구 결과 전문학술지 Carbon에 투고
- 10<sup>th</sup> Asian Conference on High Pressure Research (2021. 11. 21-25) 개최 준비
  - 조직위원장: 김재용 교수
  - 조직위원: 조준형 교수, 천상모 교수, 문순재 교수
  - 양자물질 극한물성 분야의 해외 연구진과의 공동 연구 기회를 모색
  - 대학원생들에게 연구 결과 발표 및 해외 저명학자들과의 교류 기회 제공



# 1. 참여교수 연구역량

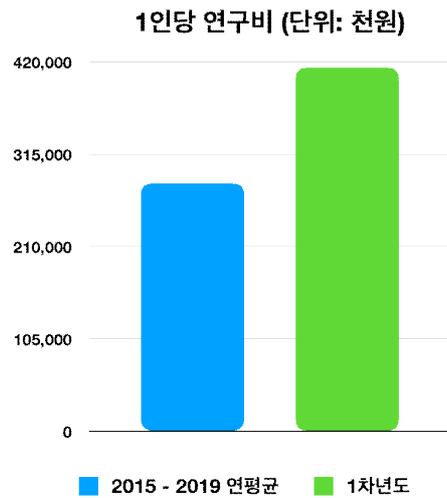
## 1.1 연구비 수주 실적

<표 3-3> 최근 1년간(2020.9.1.-2021.8.31.) 참여교수 1인당 정부, 산업체, 해외기관 등 연구비 수주 실적

항 목	수주액(천원)		
	3년간(2017.1.1.-2019.12.31.) 실적 (선정평가 보고서 작성내용)	최근 1년간(2020.9.1.-2021.8.31.) 실적	비고
정부 연구비 수주 총 입금액	5,167,763.861	3,300,348.625	
산업체(국내) 연구비 수주 총 입금액	744,770	376,775	
해외기관 연구비 수주 총 (환산) 입금액	0	44,802.642	
참여교수 수	7	9	
1인당 총 연구비 수주액	844,647.694	413,547.363	



[2015-19 대비 총연구비 89% 상승]



[2015-19 대비 1인당 연구비 47% 상승]

## 1.2 연구업적물

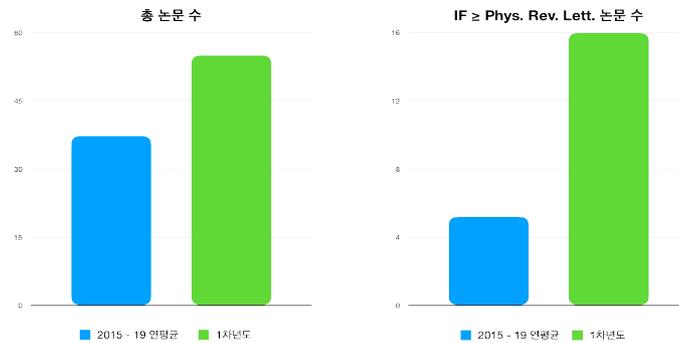
### ① 참여교수 연구업적물의 우수성

#### ❖ 1차년도 참여교수 연구실적

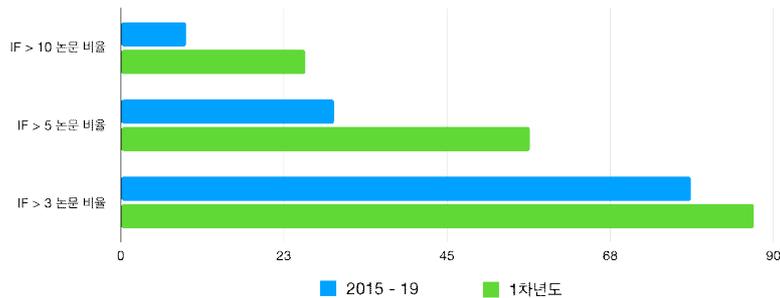
- 🎨 1차년도 참여교수들의 발표논문 55편, IF 합 485.626
- 🎨 IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수 16
- 🎨 IF > 10.0 논문수: 14편 (25.5%), IF > 5.0 논문 수: 31 (56.4%), IF > 3.0 논문 수: 48 (87.3%)

#### • 1차년도 논문 수

- 총 논문 수: 2015 - 2019년 논문 수 연평균 (37편) 대비 **48% 증가**
- IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수: 2015 - 19 연평균 대비 **207% 증가**



#### • 우수 논문 비율



- IF > 10 논문 비율: 2015 - 2019년 대비 **183% 증가**
- IF > 5 논문 비율: 2015 - 2019년 대비 **92% 증가**

#### • 1차년도 연구성과 세부지표

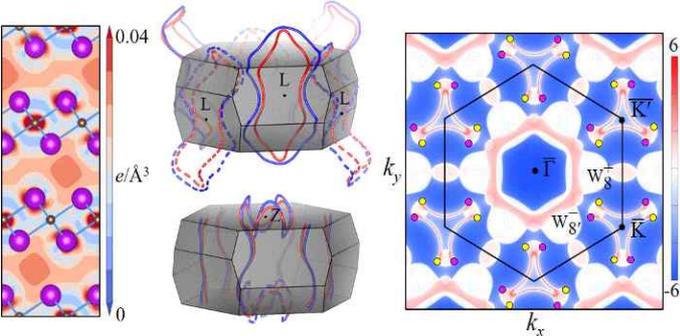
<표 3-4> 1차년도 참여교수 연구 실적

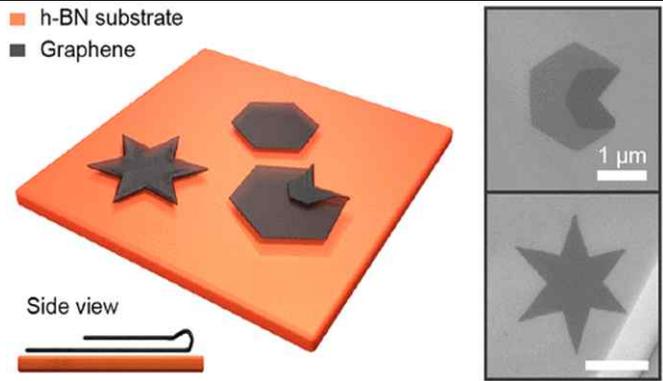
	1차년도	2015-19 연평균	증감 (%)	1단계 목표(~ 2023)
IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수	16	5.2	+207	28
IF > 5 논문 비율 (%)	56	29	+93	35
환산보정 IF 합	8.35	5.31	+57	17.52
환산보정 ES 합	21.57	20.05	+7	66.17

- IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수: 2015 - 2019 연평균 대비 2.88배, 1단계 목표치의 53.6% 달성
- IF ≥ 5인 논문의 비율 59%: 2015 - 19 대비 약 2배
- 환산보정 IF 합: 1단계 목표치의 48% 달성
- 환산보정 ES 합: 1단계 목표치의 33% 달성, 현 상태를 유지한다면 목표를 초과 달성할 것으로 예상

② 교육연구단의 학문적 수월성을 대표하는 연구업적물 (최근 1년(2020.9.1.-2021.8.31.))

<표 3-5> 1차년도 교육연구단의 대표업적물

연번	대표연구업적물 설명
1	<p>● 논문명: Ferromagnetic Weyl Fermions in Two-Dimensional Layered Electride <math>Gd_2C</math>                      • <b>Physical Review Letters</b>, volume <b>125</b>, 187203 (2020. 10), IF:9.161</p> <p>● 저자정보: 조준형 교수 (교신저자)</p> <p>● 논문 내용 요약 및 논문의 우수성</p> <p>2차원 층상 전자화물은 양이온 층 사이의 틈새 공간에 음이온 전자를 보유하는 새로운 종류의 물질로 등장. 우리는 독특한 2차원 적층 강자성(FM) 전자화물 <math>Gd_2C</math>에서 시간 역전 대칭을 깨는 Weyl 반금속 상을 발견했으며, 강자성 상은 스핀-궤도 결합을 통해 여러 쌍의 Weyl 노드로 변환되는 두 개의 스핀성 Weyl 노드 라인을 유도함을 보임. 또한 Weyl 노드를 연결하는 Fermi-arc 표면 상태와 큰 비정상 홀 전도도를 예측함. 본 연구 결과는 실온에서 강자성 전자화물 <math>Gd_2C</math>에 Weyl 페르미온의 존재를 보여줌으로써 전자화물 물질과 자기 Weyl 물리학 간의 흥미로운 상호 작용을 조사하기 위한 새로운 플랫폼을 제공할 것으로 기대됨.</p> 
2	<p>● 논문명: Spontaneous folding growth of graphene on h-BN                      • <b>Nano Letters</b>, volume <b>21</b>, pages 2033-2039 (2021. 2) IF: 11.189</p> <p>● 저자정보: 조준형 교수 (공동교신저자)</p> <p>● 논문 내용 요약 및 논문의 우수성</p> <p>그래핀 접기 개념은 흥미로운 기계적, 전자적, 광학적 특성을 지닌 준3차원 그래핀 구조의 설계에 영감을 주었음. 그러나 접는 과정을 정확하게 제어하는 것은 여전히 큰 과제임. 본 연구를 통해 간단한 화학 기상 증착 방법을 채택하여 h-BN 기판에서 그래핀의 자발적인 접힘 성장의 발견을 보고함. 접힌 모서리는 최대 1300° C의 성장 온도에서 두 개의 적층된 그래핀 층이 접합 모서리를 공유할 때 형성되며, 제일원리 밀도범함수 이론 계산을 사용하여 접힌 가장자리를 가진 이중층 그래핀이 열린 가장자리를 가진 것보다 더 안정적인 것으로 입증되었음. 이 새로운 성장 모드를 활용하여 완전히 밀봉된 가장자리를 포함하는 헥사그램 이중층 그래핀이 결국 실현되었으며, 본 연구 발견은 새로운 접힘 차원을 가진 그래핀 장치를 설계하기 위한 경로를 제공할 것으로 기대됨.</p>



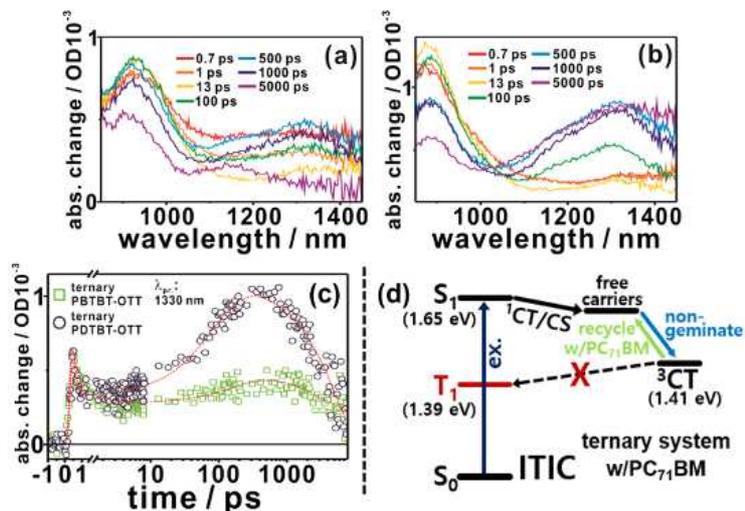
● 논문명: Charge Recycling Mechanism Through a Triplet Charge-Transfer State in Ternary-Blend Organic Solar Cells Containing a Nonfullerene Acceptor  
 • ACS Energy Letters, volume 6, pages 2610-2618 (2021. 6) IF: 23.101

● 저자정보: 정문석 교수 (공동교신저자)

● 논문 내용 요약 및 논문의 우수성

PC<sub>71</sub>BM과 비풀러렌 수용체[non-fullerene-acceptor(NFA, ITIC)]가 포함된 충전-발전 메커니즘 내부 혼합 유기 태양전지[organic solar cells (OSCs)]에 미치는 푸시풀 결합 중합체 [conjugated polymer (CP)]의 측면군 및 백본 확장 효과를 조사하였음. 과도 흡수 분광학적 결과에 따르면 CP 확장이 ITIC에서 CP로 가는 홀 전달효율을 증가시켰고, 미세하게 혼합된 구조로 인해 트리플릿 전하-전달 상태, 3CT를 통한 nongeminate 재조합에 의한 삼중수소 (T1)의 형성을 유도하였음. 특히 T1 exciton에 대한 3CT 상태 이완은 사이드 그룹 및 백본 확장 CP를 기반으로 한 3차 혼합 필름에서 PC<sub>71</sub>BM에 의해 효율적으로 완화되었음. 이로 인해 ITIC에서 CP로 정공이 전이되어 생성된 자유 캐리어가 재활용되어 최적화된 3중 혼합 형태론을 갖는 유기 태양전지의 효율성이 높아졌음. 본 연구 결과는 NFAs에서 CP로 광 유도 정공 전송을 통해 전하 생성 메커니즘에 대한 새로운 시각을 보여줄 것임.

3



(a) PBTBT-OTT/PC71BM/ITIC 혼합 필름의 TAS. (b) PDTBT-OTT/PC71BM/ITIC 혼합 필름의 TAS. (c) 3차 혼합 필름의 TA kinetic profiles. 샘플은 1.6 μJ/cm<sup>2</sup>의 620nm에서 펌핑되고 1330nm로 조사되었다. (d) 3차 혼합 시스템에서 3CT 상태를 통과하는 전하-재활용 경로의 개략도.

● 논문명: Patterning of type-II Dirac semimetal PtTe<sub>2</sub> for optimized interface of tellurene optoelectronic device

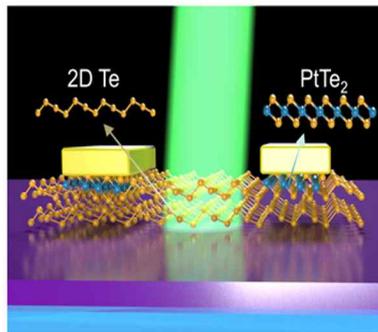
• **Nano Energy**, volume **86**, 106049 (2021. 8) IF: 17.881

● 저자정보: 정문석 교수 (공동교신저자)

● 논문 내용 요약 및 논문의 우수성

백금막이 코팅된 2차원 물질의 국부적인 영역에 레이저를 조사함으로써 선택적 영역에 전극 물질인 PtTe<sub>2</sub> 전이에 성공하였으며, 이를 통해 효율적인 패터닝 공정과 이상적인 반도체-전극 계면 구현 기술을 개발. 기존 전극의 패터닝은 마스크 상에 설계된 도면에 극자외선 빛을 조사하여 패턴을 형성하는 노광공정과 가열한 전극 증착물을 기체화시켜 형성된 패턴 위에 증착하는 방법으로 공정되었음. 이러한 공정은 노광 과정에서 남게 되는 감광액 불순물로 인해 반도체 내 결함과, 증착과정에서 발생하는 전극과 반도체 계면의 불안정, 변칙적 특성 때문에 그 특성이 크게 저하될 수 있음. 얇은 백금 막이 코팅된 텔루륨 물질의 국부적인 영역에 레이저를 조사함으로써 선택적인 영역에 전극 물질인 PtTe<sub>2</sub> 합성 기술을 개발하였음. 이를 통해 텔루륨과 PtTe<sub>2</sub>의 반도체-전극을 형성하였으며, 이는 이미 결합된 물질 사이에 새로운 결합을 이끌어 내는 방법으로 변칙성이 최소화된 안정적인 결합을 가능하게 하여 전도성 및 이동도를 수 백배 이상 향상시켰으며, 광특성을 크게 개선시켰음. 또한 기존 복잡한 공정을 단순화함으로써 다양한 유연 소자 제작 및 집적 회로 상용화를 위한 공정 효율 향상과 비용 절감을 가능하게 하였음. 뿐만 아니라 기존 높은 온도와 통제된 조건에서 성장되던 PtTe<sub>2</sub> 물질을 상온에서 조건 없이 가능하게 하였다는 점에서, 물질 합성 분야에서도 가치가 높은 연구로 보이며 PtTe<sub>2</sub> 물질의 물리적 특성을 고려할 때 이는 자성반도체 및 초전도체 분야에서도 주목할 만한 연구가 될 것으로 보임.

4



레이저 패터닝을 통한 PtTe<sub>2</sub> 전이 및 반도체-전극 계면 형성

● 논문명: Augmented All-Optical Active Terahertz Device Using Graphene-Based Metasurface

• **Advanced Optical Materials**, volume **9**, 2100462 (2021. 5) IF: 9.926

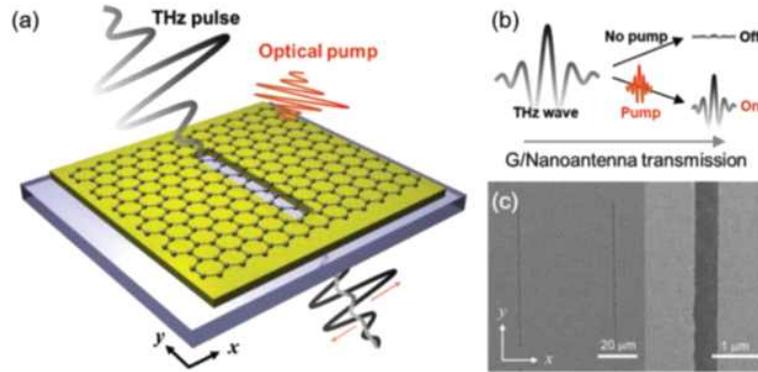
● 저자정보: 정문석 교수 (공동교신저자)

● 논문 내용 요약 및 논문의 우수성

광자극 그래핀은 페르미 준위에 따라 양성(반도체 유사) 또는 음성(금속 유사) 반응이 나타나 게이트 제어, 도핑, 성장에 따라 튜닝됨. 양과 음의 광전도성 반응은 빛의 투과를 조절하는 매우 빠른 광학 변조기로서의 응용의 잠재성을 가지고 있음. 하지만 전자기파의 흡수가 적고 광-유도 전도도 변화가 제한되어있어, 광-여기된 그래핀의 높은 on/off 비율을 달성하는 것은 어려운 일임. 본 연구에서, 음성 형태(negative type)의 높은 on/off 비율과 초고속

5

테라헤르츠 변조기는 그래핀/금속 나노슬릿 안테나를 사용하여 실험적으로 시연하였음. 그래핀이 나노슬릿 안테나의 전체를 덮으면 테라헤르츠 파는 완벽하게 차단됨(off-state). 이러한 완벽한 소멸은 나노갭 근처의 강한 국소장에 의한 그래핀의 강화된 인트라밴드 흡수에 기인함. 그러나 광 펌프가 그래핀/나노슬릿 안테나에 적용되면 테라헤르츠 전송은 off-공명에서 on-공진으로의 독특한 변조를 유도하는 그래핀의 광 유도 투명도로 인해 공진적으로(on 상태) 복구됨. 또한 강한 테라헤르츠 장(field) 구동 운반자 재분배에 의해 유도된 빠른 캐리어 이완은 과도 테라헤르츠 전송의 더 빠른 변조를 담당함. 그 결과는 높은 온/오프 비율과 초고속 시간 스케일을 갖춘 음성 응답 테라헤르츠 변조 애플리케이션으로 가는 길을 열어줄 것임.



- a) 단층 그래핀으로 덮인 금속 구멍으로 구성된 광전자 방출 그래핀/나노슬릿 장치의 테라헤르츠 반응 모식도. 광학 펌프는 테라헤르츠 빔이 입사되는 동안 45도의 각도로 적용.
- b) 광학적 펌핑 유무에 따른 그래핀/나노슬릿의 테라헤르츠 전파 도표.
- c) 길이  $75\mu\text{m}$ , 폭  $500\text{nm}$ 의 테라헤르츠 나노슬릿 안테나의 주사전자현미경 이미지. 안테나 배열의 정점(pitch) 크기는  $85\mu\text{m}$ (y축)와  $50\mu\text{m}$ (x축)이며, 금막의 두께는  $50\text{nm}$ 임.

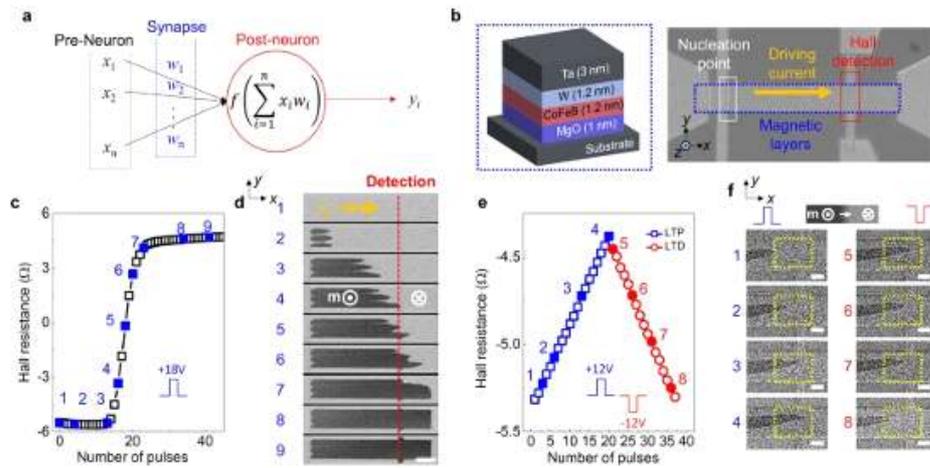
● 논문명: Integrated neuromorphic computing networks by artificial spin synapses and spin neurons  
 • NPG Asia Materials, volume 13, 11 (2021. 1) IF: 10.481

● 저자정보: 홍진표 교수 (공동교신저자)

● 논문 내용 요약 및 논문의 우수성

6

Spin orbit torque를 이용한 crossbar 구조를 이용해 하나의 소자를 시냅스와 뉴런으로 사용하여 뉴로모픽 컴퓨팅 네트워크에 사용하였음. Domain wall motion을 이용하여 시냅스뉴런으로서의 동작여부를 확인하였음. 신호를 nucleation point에 인가를 하고 detection point에 신호를 가한 뒤의 hall resistance의 변화를 통해 domain wall의 움직임을 detect 하였음. Hall resistance는 인가된 pulse의 수에 따라 그 크기가 linearity한 특성을 보였음. 이는 세포 내 뉴런간 신호를 주고받는 시냅스에서 potentiation과 depression과 유사한 특성임. 스핀을 이용한 뉴로모픽 뉴런/시냅스 소자를 1시냅스/1뉴런의 회로를 구성하고 작동여부를 확인하였으며, 같은 현상이 N시냅스/N뉴런 구조에서도 구동이 가능함을 실험적으로 증명하였음. 또한 MNIST 시뮬레이션을 통해 시냅스 뉴런의 반복적인 특성을 확인하였으며, software synapse, spin-stripe domain type synapse, conventional domain type synapse, oxide-based RRAM synapse와 비교하였음. 이번 실험의 spin-stripe domain type synapse가 software synapse와 유사하게 94% 정도의 높은 정확도를 가짐을 확인하였음.



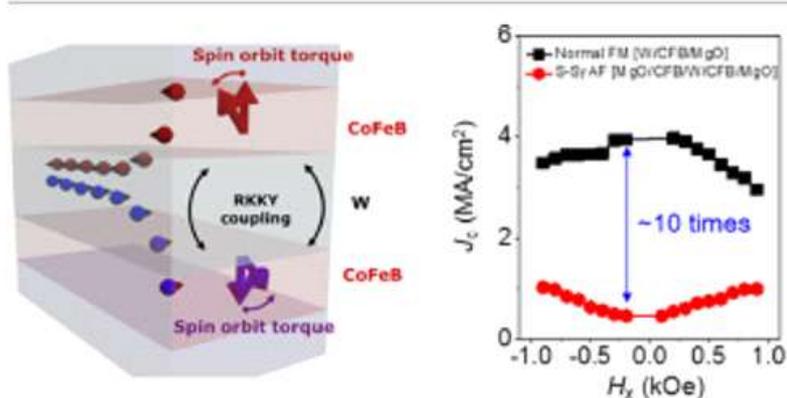
● 논문명: Ultralow-current magnetization switching in nearly compensated synthetic antiferromagnetic frames using sandwiched spin sources  
 • **Acta Materialia**, volume **208**, 116708 (2021. 4) IF: 8.203

● 저자정보: 홍진표 교수 (공동교신저자)

● 논문 내용 요약 및 논문의 우수성

기존의 heavy metal/ferromagnet/oxide heterostructure 구조는 스핀 전류가 heavy metal에서 ferromagnet 방향으로만 흐른다는 단점이 있음. Oxide/ferromagnet/heavy metal/ferromagnet/oxide의 RKKY 구조를 이용하면 상단 fm층과 하단의 fm층으로 흐르는 스핀 전류가 양방향으로 흐를 수 있음을 보임. 또한, oxide/ferromagnet/heavy metal/ferromagnet/oxide의 RKKY 구조에서는 상단과 하단의 ferromagnet의 net magnetization이 외부자기장의 크기가 증가함에 따라 줄어들고, 그에 따라 switching current가 비례하게 증가하였음. 이는 effective perpendicular magnetic anisotropy energy가 외부자기장에 의한 영향을 받기 때문임. 이번 실험에서는 이러한 구조에서 소자의 구동전류가 10배 감소함을 확인하였음.

7



● 논문명: Topological guided-mode resonances at non-Hermitian nanophotonic interfaces  
 • **Nanophotonics**, volume 10, pages 1853 - 1860 (2021. 4) IF: 8.449

● 저자정보: 송석호 교수 (공동교신저자)

● 논문 내용 요약 및 논문의 우수성

위상학적 경계 상태는 서로 위상학적으로 구분되는 밴드갭 물질의 경계에서 발견되는 국소적인 파동임. 이는 최근 응집물질물리계의 화두인 위상학적 절연체, 위상학적 반금속 등에서 발견된 현상으로, 기존의 파동상태와는 달리 물질의 전역적인 특성인 밴드 위상에 의해 보호되며 견고성과 단방향 전파성 등의 파동 수송특성을 지님. 본 연구에서는 이러한 고체 물성에서 발견된 위상학적 경계 상태를 도파모드공명을 발생시키는 평판형 광-공진격자 소자에서 구현 하는 방법론을 제안하였음. 고체 물성과는 달리 누출 손실에 의한 열린계(비-허미션) 성질을 갖는 평판형 광-공진격자 시스템의 위상학적 상전이 현상과 접합 경계에서 발견되는 위상학적 경계 상태의 발현 원리를 서술하였음. 도파모드공명의 위상학적 경계 상태의 발현을 이용하면 기존의 평판형 광-공진소자 면적의 소형화가 갖는 원리적 한계를 타파 할 수 있을 뿐만 아니라 기존 도파모드공명소자 동작의 각도 민감성을 개선 하는 원리를 제공함. 또한, 위상학적 경계 상태가 갖는 위상학적 보호 특성에 의해 소자 제작에서 발생하는 국소적인 결함 등에 있어 동작 성능을 견고하게 유지 할 수 있음을 보였음. 따라서 본 연구의 시사점은 열린계 파동 시스템에서 위상학적 경계 상태 발현을 서술하여 새로운 위상 물리 현상을 탐구하는 플랫폼을 제안한 것과, 이러한 위상학적 원리가 기존 평판형 광 소자에 적용 되었 을 때 성능 개선과 같은 잠재적 기술 응용 가치를 보였다는 것에 있음.

8

● 논문명: Defect suppression and photoresponsivity enhancement in methylammonium lead halide perovskites by CdSe/ZnS quantum dots  
 • **Journal of Colloid and Interface Science**, volume 590, pages 19 - 27 (2021. 1) IF: 8.128

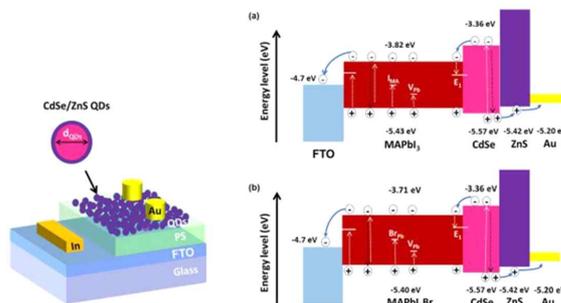
● 저자정보: 김은규 교수 (공동교신저자)

● 논문 내용 요약 및 논문의 우수성

DLTS 법으로 CdSe/ZnS 양자점이 페로브스카이트의 결함상태와 수송특성에 미치는 영향 조사결과, 양자점이 있는 MAPbI<sub>3</sub> 및 MAPbI<sub>2</sub>Br 필름에서 Ev+0.37 eV 및 Ev+0.56 eV 준위의 트랩밀도가 크게 감소하였고, 600nm 파장의 광 반응성은 양자점을 가진 경우 기준 시료에서 비해 각각 100배 및 27배 더 크게 나타났음.

본 연구 결과는 CdSe/ZnS 코어-셸 양자점들이 페로브스카이트 (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbX<sub>3</sub>, X=I, Br)박막내 운반자 트랩의 농도를 제어하게 되어 운반자 수송 특성 및 광 반응성을 크게 향상시킴으로써, 고효율의 페로브스카이트 소자제조를 최적화하기 위한 방법이 될 수 있음을 제시.

9



<CdSe/ZnS 양자점을 갖는 페로브스카이트 소자구조와 에너지밴드, 운반자 수송과정 모식도 >

### ③ 참여교수 특허, 기술이전, 창업 실적의 우수성

#### ❖ 참여교수 특허 실적

- 1차년도에 참여교수들은 국제특허 5건과 국내 특허 5건을 등록하였음.
- 1차년도 특허 건수는 2015-2019 기간 동안 특허건수(국제특허 5건, 국내특허 2건)를 초과하였음.

<표 3-6> 1차년도 참여교수 특허 실적

항목	연 번	등록국 가	등록일자 (YYYYMM DD)	등록번호	발명의 명칭	발명인 중 참여교수 성명
국제특허	1	중국	20210319	ZL20171128 3653.5	비가역 광투과 소자 및 이를 포함하는 광학 장치	송석호
	2	미국	20210601	11,022,662	THREE-AXIS MAGNETIC SENSOR HAVING PERPENDICULAR MAGNETIC ANISOTROPY AND IN-PLANE MAGNETIC ANISOTROPY	홍진표
	3	미국	20210105	10,885,960	SPIN DEVICE, AND OPERATING METHOD THEREFOR AND MANUFACTURING METHOD THEREFOR	홍진표
	4	미국	20210216	10,923,656	SWITCHING ATOMIC TRANSISTOR AND METHOD FOR OPERATING SAME	홍진표
	5	미국	20210622	11,043,536	TWO-TERMINAL SWITCHING ELEMENT HAVING BIDIRECTIONAL SWITCHING CHARACTERISTIC, RESISTIVE MEMORY CROSS-POINT ARRAY INCLUDING SAME, AND METHOD FOR MANUFACTURING TWO-TERMINAL SWITCHING ELEMENT AND CROSS-POINT RESISTIVE MEMORY ARRAY	홍진표
국내특허	1	대한민국	20201221	10-2195923	박막 결함 검사용 데이터베이스의 구축 방법 그 데이터베이스를 이용한 박막의 결함 검사 방법, 및 그 데이터베이스를 포함하는 박막의 결함 검사 장치	김은규
	2		20201231	10-0188729	불연속적인 기하학적 위상 회절광학소자로부터 연속적인 기하학적 위상 회절광학소자를 제조하는 방법	송석호
	3		20210517	10-2255436	자기터널접합 소자 및 그 제조방법	홍진표
	4		20210603	10-2262706	합성형 반강자성체 및 이를 이용하는 다중비트 메모리	홍진표
	5		20201117	10-2182095	3축 자기 센서	홍진표

• 참여교수 국제특허 우수성

<표 3-7> 1차년도 참여교수 우수 국제특허 실적

연번	국제특허 설명
1	<p> <input type="checkbox"/> 특허명: 비가역 광투과 소자 및 이를 포함하는 광학 장치  <input type="checkbox"/> 등록국가: 중국  <input type="checkbox"/> 등록일자: 2021. 3. 19.  <input type="checkbox"/> 등록번호: ZL201711283653.5  <input type="checkbox"/> 참여교수: 송석호         </p> <p> <input type="checkbox"/> 특허 내용 요약 및 우수성            광 절연기 및 광 순환기 등의 비가역 광소자는 광 신호처리 및 레이저 소스 보호를 위해 반드시 필요한 광소자임. 광학 시스템에서 레이저가 엔진의 역할을 한다면, 비가역 광소자는 브레이크 및 핸들의 역할을 한다 말할 수 있음. 광섬유를 이용한 시스템에는 이미 간편하게 사용할 수 있는 비가역 광소자들이 상용화 되었으며 널리 사용되고 있음. 상용화된 비가역 소자들은 주로 페러데이 회전을 기반으로 설계되었으며, 해당 원리는 자기-광 결정을 필요로 함. 하지만 자기-광 결정은 집적화되기 어렵다는 단점이 있기 때문에 집적형 비가역 소자의 개발을 위해 새로운 원리를 기반으로 하는 집적 가능한 비가역 광소자에 대한 연구가 활발히 진행중임. 이미 다양한 광학 소자들이 칩 위에 집적가능하도록 개발되었지만, 비가역 광소자는 아직까지 실제로 사용가능한 수준의 연구결과가 보고되지 않았음. 비가역 소자는 소스와 핵심 역할을 하는 광 회로 사이에 삽입되어야 하기 때문에 이들을 칩 위에 올리는 연구가 완료되지 않는다면 진정한 의미의 광 집적회로는 달성할 수 없다고 할 수 있음. 빛의 가역성을 위반하기 위해서는 자기-광 결정, 비선형매질, 시간에 따른 굴절률 변화 중 한 가지 조건이 반드시 필요함. 따라서 집적형 비가역 소자의 개발을 위해서 비선형 공진구조 및 시간변화하는 회절격자를 이용한 연구들이 진행되어왔음. 하지만 이들은 공진구조 및 모멘텀 매칭을 요구하기 때문에 매우 좁은 대역폭을 갖는다는 치명적인 단점이 있음. 이로 인해 여러가지 파장을 이용하는 회로에 적용하는 것은 불가하며, 심한 경우에는 온도 변화에 의한 공진주파수 변화로 인해 정상적인 작동이 불가능하거나 초저온을 요구하는 연구결과도 있음. 이러한 문제점을 해소하기 위해 복소굴절률 분포를 이용한 비가역 소자를 제안했음. 해당 소자는 광학계의 특이점 근방에서 나타나는 특이 동역학특성을 이용하여 시스템 변화에 매우 둔감한 형태로 빛의 가역성을 위반할 수 있음. 제안된 소자는 복소 굴절률의 공간변조를 갖는 광 도파도로 구성되어있으며 이득포화(gain saturation)가 고려되었음. 제안된 구조는 10dB를 이상의 전후방 전송 비를 유지하면서 100THz 이상의 초광대역 비가역 성능과 높은 순방향 전송 효율 (~100%)을 나타낸다는 큰 장점이 있음. 이러한 성능들, 특히 넓은 대역폭은 기존의 공진 구조를 이용한 비가역 소자에서는 얻을 수 없는 특성임. 넓은 대역폭은 펄스레이저 기반 신호처리를 위해서 반드시 필요한 비가역 소자의 조건이 됨. 또한 제안된 구조는 칩 위에 구현 가능하며 따라서 광 집적회로의 구성에 사용될 수 있음. 비가역 광소자는 광 아이솔레이터와 광 순환기 등의 광 신호처리에 있어 필수적인 구성요소이며 칩 위에서 이를 구현하는 것은 광 집적회로 분야의 발전에 큰 역할을 할 것임.         </p>

특허명: THREE-AXIS MAGNETIC SENSOR HAVING PERPENDICULAR MAGNETIC ANISOTROPY AND IN-PLANE MAGNETIC ANISOTROPY

등록국가: 미국

등록일자: 2021. 6. 1.

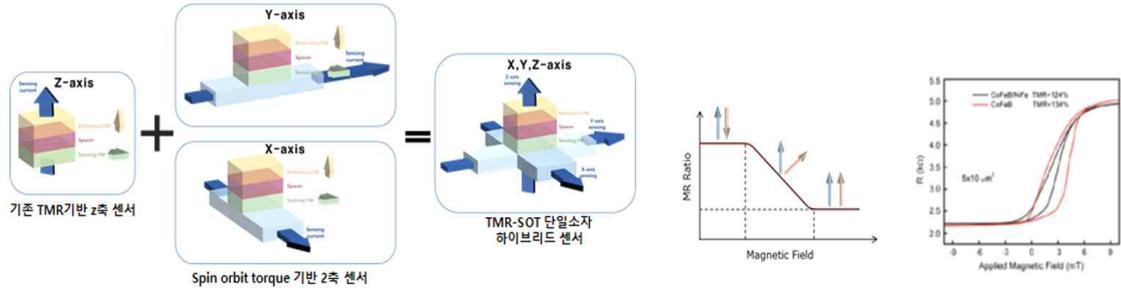
등록번호: 11,022,662

참여교수: 홍진표

특허 내용 요약 및 우수성

2

기존의 자기 센서의 경우 x축으로 전류를 흘려주고 z축으로 자기장 가하여 유도되는 홀 효과를 통하여 자기장을 감지함. 따라서 x, y, z축의 자기장을 감지하기 위해서는 모든 방향으로의 각각의 소자가 필요하였음. 제시한 특허의 경우 x, y축으로는 spin-orbit torque (SOT) 효과 중에서 spin hall effect와 rashba effect를 이용하여 x, y축의 자기장을 감지하고, z축 자기장의 경우 magnetic tunnel junction을 이용하여 선형적인 신호를 관측하는 방식의 x,y,z축으로 통합된 센서를 이용하고자 하였음. 이는 특히 차세대 스마트 자동차등에 탑재되는 센서는 신뢰성과 정밀도가 높고 극한환경을 견뎌야 하는 등의 조건을 충족시켜야 함. SOT 기능을 통한 고기능성 자기 센서를 개발은 이와 같은 요구 조건을 충족시킬 수 있고, 고기능성, 고편의성을 제공할 수 있음. 또한 기존의 복잡한 회로 구성을 단일 소자로 대체할 수 있다는 점에서 차별성을 지니며, 공정의 간소화와 소비전력 및 공정비용의 절감을 가져올 수 있을 것으로 기대됨. 스마트 자동차 시장뿐 아니라 IOT 시대에서 핵심 기술이 될 것으로 전망되는 웨어러블 센서 및 홈인터넷에 탑재되는 센서의 영역까지 파급효과가 있을 것으로 전망됨.



특허명: SPIN DEVICE, AND OPERATING METHOD THEREFOR AND MANUFACTURING METHOD THEREFOR

등록국가: 미국

등록일자: 2021. 1. 5.

등록번호: 10,885,960

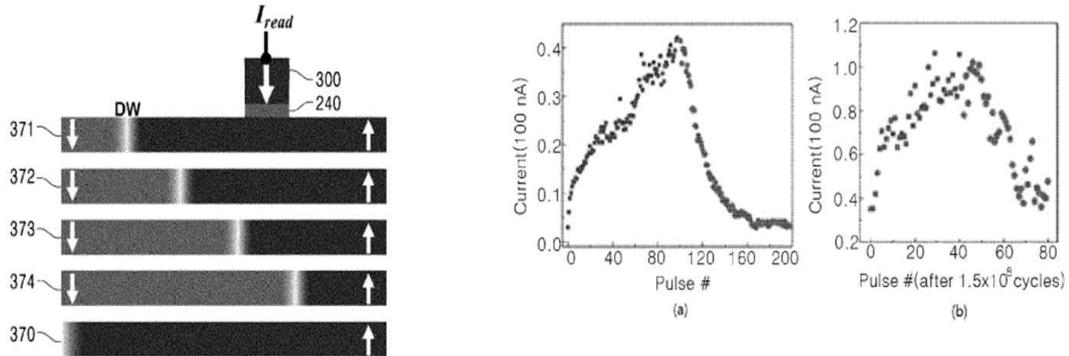
3

참여교수: 홍진표

특허 내용 요약 및 우수성

Spin 시스템 중에서 domain wall motion을 이용하여 구동하는 synapse & neuron 소자에 대한 특허로 domain wall이 magnetic tunnel junction (MTJ)의 detection 영역에 도달하는 시점을 이용하여 integration & firing 하는 소자와 domain wall의 up & down 비율을 통하여 시냅스 기능을 구현하고자 하였음. 기존 DRAM을 이용하는 CMOS의 경우 0과 1만을 사용하기에 매우 큰 파워가 필요한 반면 제시한 특허의 경우 multilevel의 저항을 이용하기에 기존의

스핀 전달 토크에 비해 더 낮은 전류로도 자화 반전이 가능하므로, 전력 소모의 감소를 기대할 수 있음. 또한 구조가 기존의 CMOS에 비해 간단하기 때문에 제작이 용이함. 본 발명을 통해 저전력, 고집적 뉴로모픽 컴퓨터 소자의 제작에 큰 도움이 될 것으로 예상할 수 있음.



특허명: SWITCHING ATOMIC TRANSISTOR AND METHOD FOR OPERATING SAME

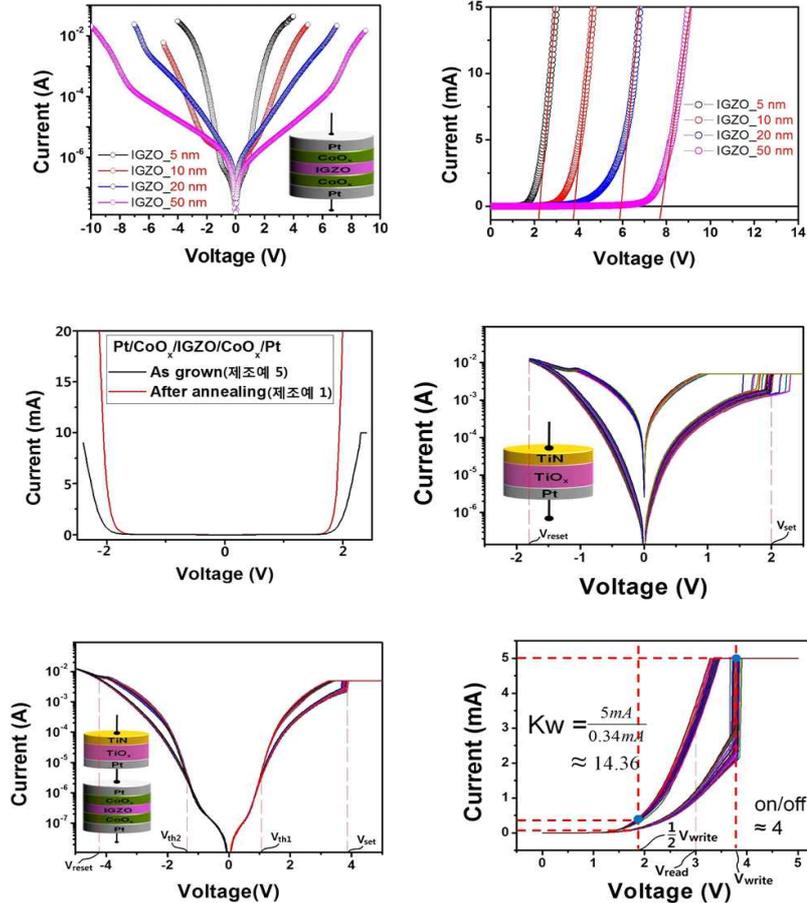
등록국가: 미국

등록일자: 2021. 2. 16.

등록번호: 10,923,656

참여교수: 홍진표

특허 내용 요약 및 우수성



4

저항성 메모리 소자를 어레이로 구현하기 위해서는 메모리 특성을 나타내는 저항성 소자와 더불어 이 저항성 소자에 전기적으로 연결된 선택 소자를 구비하는 것이 일반적임. 상기 선택 소자는 트랜지스터 또는 다이오드일 수 있음. 그러나, 트랜지스터는 펀치 스루(punch through)와 같은 단채널 효과(short channel effect)로 인해 소자 사이즈 감소에 한계가 있음. 또한, 일반적인 다이오드는 한 방향으로만 전류를 흐르게 하므로, 저항성 소자와 같이 양극성에서 저항 변화 특성을 나타내는 양극성(bipolar) 소자에는 적절하지 않은 단점이 있음. 또한, 트랜지스터의 경우, 게이트 전극의 형성, 소오스/드레인 영역들의 형성 및 소오스/드레인 전극들을 형성하여야 하므로 고집적화를 위해서는 적절하지 않은 단점이 있음. 본 발명은 양방향 스위칭 특성을 가지면서도 소자 동작 특성이 대칭적인 2-단자 스위칭 소자 및 단위 셀 내에 하나의 2-단자 스위칭 소자를 포함하여 집적도가 향상된 저항성 메모리 소자 크로스-포인트 어레이의 제조방법을 제공함.

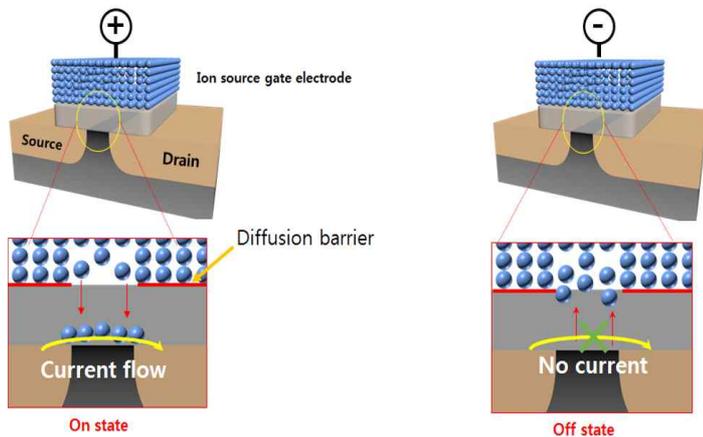
특허명: TWO-TERMINAL SWITCHING ELEMENT HAVING BIDIRECTIONAL SWITCHING CHARACTERISTIC, RESISTIVE MEMORY CROSS-POINT ARRAY INCLUDING SAME, AND METHOD FOR MANUFACTURING TWO-TERMINAL SWITCHING ELEMENT AND CROSS-POINT RESISTIVE MEMORY ARRAY

- 등록국가: 미국
- 등록일자: 2021. 6. 22.
- 등록번호: 11,043,536
- 참여교수: 홍진표

특허 내용 요약 및 우수성

본 특허는 selective diffusion barrier를 이용하여 안정적인 동작과 전기장을 통해 원자의 움직임 조절이 가능하며, 전원이 차단되어도 소자 상태가 변하지 않는 비휘발성의 특징을 가지는 트랜지스터 발명에 대한 것임. 종래의 일반적인 트랜지스터의 경우 전원이 나가면 기억된 상태가 사라지는 특징을 가지고 있음. 이러한 특징 때문에 연산 소자로 사용하기 위해서는 기억을 담당하는 메모리 부분이 따로 떨어져 나와 있어야 하는데, 데이터를 저장하고 다시 불러오는 과정에서 메모리와 연산 부분 사이의 병목현상이 발생하므로 속도저하가 발생함. 또한 수평방향의 채널을 사용하기 때문에 직적도 향상에 한계가 있었음. 본 발명에서 제시하고 있는 원자 트랜지스터는 원자의 움직임을 조절함으로써 전류의 흐름을 조절함. 따라서 전원이 사라지더라도 기억상태를 유지 할 수 있다는 장점이 있음. 또한 게이트옥사이드가 존재하지 않으며, selective diffusion barrier의 추가로 안정적인 소자 동작이 가능함.

5



## 2. 산업·사회에 대한 기여도

### ❖ 친환경 에너지 분야 문제 해결

- 웨어러블 전자기기 활용을 위한 에너지 하베스팅

IT 기술의 발전에 따라 전자기기의 휴대성이 증가하고 있으며 특히 의복과 결합된 전자제품인 웨어러블 기기는 휴대성의 정점이라고 할 수 있음. 웨어러블 기기의 초기 연구는 플렉서블 디스플레이처럼 단순히 전자제품을 직물 위에 옮겨놓은 수준이었지만 자극반응이나 환경응답과 같이 신기능을 보이는 섬유가 발명되며 IoT나 헬스케어 같이 다양한 분야에서 무궁무진한 활용가능성을 보임. 하지만 웨어러블 기기의 작동에는 지속적인 전력공급이 필요한데 외부에서 전력을 공급받는 방식은 주기적인 충전이 필요하여 장기간의 연속사용이 힘들. 이러한 어려움을 극복하기 위하여, 일상에서 버려지는 에너지를 사용가능한 형태로 수집하는 기술인 에너지 하베스팅이 주목받고 있음. 특히 인체의 움직임에서 발생하게 되는 마찰을 통해 전기를 생산하는 마찰발전 방식은 압력을 통해 발전하는 방식보다 유효표면적을 늘리기 쉬워 발전량 증가에 이점이 있음.

홍진표 교수 연구실은 SOT 기능을 통한 고기능성 자기 센서를 개발하였으며, 이를 특허로 등록하였음 (등록번호 10,022,662). 이 결과는 기존의 복잡한 회로 구성을 단일 소자로 대체할 수 있다는 점에서 차별성을 지니며, 공정의 간소화와 소비전력 및 공정비용의 절감을 가져올 수 있을 것으로 기대됨. 스마트 자동차 시장뿐 아니라 IOT 시대에서 핵심 기술이 될 것으로 전망되는 웨어러블 센서 및 홈인터넷에 탑재되는 센서의 영역까지 파급효과가 있을 것으로 전망됨.

- 고에너지 밀도 수소에너지 저장매체 발굴 연구 수행

친환경 에너지로서 수소에너지가 많은 각광을 받고 있음. 이는 수소가 석유와는 달리, 연소 효율이 높고 산소와 반응하였을 때 공해물질을 배출하지 않는 청정에너지원이라는 점 때문. 그러나 수소는 금속 표면에 침투성이 강해 기체나 액체 상태로 저장이 어렵고 안전상의 이유로 아직 상용화 단계에 이르지 못하고 있음. 따라서 수소를 안전하고 효과적으로 생산·저장·이동하기 위한 방안들이 많이 연구되어 왔는데, 수소를 금속 수소화물의 형태로 저장하는 수소저장법이 가장 안전하고 높은 에너지 밀도를 가지는 방법으로 대두되고 있음.

최근 고압 혹은 에너지 밀도가 높은 금속수소화물을 이용한 수소 에너지 저장에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있음. 지금까지의 수소저장합금의 수소저장특성에 대한 연구는 200 bar 미만의 저압에서 진행되었지만, 김재용 교수는 다이아몬드 앤빌셀을 이용하여 TiZrNi 합금이 5.07 GPa 압력에서 4.5 wt.%의 수소를 저장하며, 시료가 구조적으로 상변이 없이 안정함을 증명하였음. 참고로, 이는 100 kg의 TiZrNi 시료를 탑재한 수소자동차에 적용시 한번 충전으로 서울에서 부산까지 갈 수 있는 양임. 이러한 결과를 바탕으로 조만간 TiZrNi 합금외에도, AlH<sub>3</sub> (Alane), Zr/Co 합금과 BNNT (Boron Nitride Nano Tube)나 SBA-15 (Santa Barbara Amorphous-15)와 같은 다공성물질 등과 같은 고순도의 수소저장소재 개발을 추진 중이며 에너지 저장 기술 발전에 기여할 것으로 기대됨.

- 고온 초전도 현상 연구 수행

인류가 직면하고 있는 에너지 문제와 이와 연관된 기후 변화 문제를 해결하기 위해서는 신재생 에너지 지원 개발이나 에너지 손실이 적은 소재 개발 등이 필요함. 고온 초전도체는 에너지 손실이 없는 소재로 사용할 수 있으나, 초전도가 나타나는 임계 온도가 낮아 실제 활용에는 제약이 있음. 상온에서 사용할 수 있는 고온 초전도체가 발견된다면, 인류의 에너지 및 환경 문제를 해결할 수 있을 것임. 조준형 교수와 문순재 교수는 다음과 같이 고온 초전도체에 대한 연구를 수행하여 이 현상의 메커니즘에 대한 단서를 제시하였음.

- 금속 수소화물의 상온 초전도 현상 메커니즘 이해

수소를 포함하고 있는 수소화물은 압력이 가해지면 상온에서 초전도 현상을 보이는 현상으로 최근 많은 주목을 받고 있음. 조준형 교수는 상온 초전도 현상을 보이는 다양한 수소화물에 대한 연

구를 수행하여 이 물질의 전자 구조와 결합 특성을 분석하였으며, 이를 통해 이 물질이 상온에서 초전도 현상을 보이는 원인을 밝혔음.

- 고온 초전도체 구리 산화물과 유사한 이리듐 산화물의 전자 구조 연구

현재 초전도 전이 온도가 가장 높은 물질은 구리 산화물임. 구리 산화물이 보이는 초전도 상태와 이와 인접한 유사겍 상태의 원인은 응집물질물리학 분야에서 풀리지 않는 문제로 남아 있음. 만약 구리 산화물이 보이는 초전도 상과 유사겍 상의 원인을 밝혀낸다면 초전도 임계 온도가 더 높은 새로운 초전도 물질 개발에 큰 도움을 줄 수 있을 것임. 문순재 교수는 구리 산화물과의 유사성으로 인해 초전도 상, 유사겍 상을 보일 것으로 기대되는 이리듐 산화물에 대한 연구를 수행하였음. 이를 통해 이리듐 산화물의 광전도도 스펙트럼의 비금속-금속 전이 현상을 발견하였음. 비금속-금속 전이의 과정에서 나타나는 광전도도를 분석하여 전하-스핀-격자의 상호 작용을 관측하였음. 이 결과는 고온 초전도체의 물성 이해를 위한 중요한 정보를 제공함.

## ◆ 반도체 및 광소자 분야

• 인공지능 소자 개발

반도체 산업의 발전과 더불어 사람이 하는 감각과 인지, 상호작용 등을 따라할 수 있는 인공지능 (AI) 연구가 활발하게 진행되고 있음. 하지만 현재 진행되고 있는 소프트웨어 기반의 인공지능 구현은 많은 연산이 필요하기 때문에 막대한 전력과 연산시간을 요구함. 이에 반해 인간의 두뇌는 뉴런과 시냅스라는 세포가 적은 전력과 짧은 시간으로 감각, 인지, 상호작용을 수행함. 뉴런은 앞단에서 받은 신호를 모았다가 발산하는 특성을 가지며, 시냅스는 뉴런사이에 위치하여 뉴런이 발산한 신호의 세기를 조절하는 웨이팅 (weighting)을 부여함. 뉴런과 시냅스의 이러한 전기적 특성을 모방하는 인공지능 소자의 개발이 화두로 떠오르고 있으며 해당 기술은 선점할 경우 국내 산업에 크게 이바지 할 뿐만 아니라 국제 표준화 제시 등 세계시장을 선도할 수 있어 반드시 연구가 이루어져야 하는 분야임.

홍진표 교수는 다음과 같은 연구를 통하여 인공지능 소자 기술 개발에 이바지하였음.

- 멀티레벨 저항변화 메모리의 시냅스 거동 연구

저항변화 메모리는 절연성 물질 내부에 국소적으로 전도성 필라멘트를 형성하여 거시적인 저항을 조절하는 메모리임. 절연물질 내부에 생성된 필라멘트의 연결을 제어하여 저항의 크기를 조절할 수 있음. 저항변화 메모리의 집적도를 향상시키는 방법을 개발하였으며 관련 특허를 등록하였음 (등록번호 10,923,656).

- 스핀트로닉스 기반의 뉴런 및 시냅스 개발 연구

일정 영역에 걸쳐 같은 스핀 방향을 지닌 영역을 도메인이라고 하며 스핀이 서로 다른 도메인간의 경계를 도메인 월이라고 함. 도메인 월의 위치를 조정함으로써 소자의 저항을 변화시킬 수 있으며 이를 통해 시냅스를 모사할 수 있음. Domain wall이 magnetic tunnel junction (MTJ)의 detection 영역에 도달하는 시점을 이용하여 integration & firing 하는 소자와 domain wall의 up & down 비율을 통하여 시냅스 기능을 구현하였으며, 특허로 등록함 (등록번호 10,885,960). 이 결과는 domain wall motion을 이용하여 구동하는 synapse & neuron 소자에 적용될 수 있는 것으로, 저전력, 고집적 뉴로모픽 컴퓨터 소자의 제작에 큰 도움이 될 것으로 예상됨.

• 신개념 나노광소자 개발

송석호 교수 연구팀은 기존의 집적형 비가역 소자에 활용되는 자기-광 소자의 단점을 극복하는 새로운 비가역 소자를 제안하였음. 비가역 광소자는 광 신호처리 및 레이저 소스 보호를 위해 반드시 필요한 광소자임. 광학 시스템에서 레이저가 엔진의 역할을 한다면, 비가역 광소자는 브레이크 및 핸들의 역할을 함. 광섬유를 이용한 시스템에는 이미 간편하게 사용할 수 있는 비가역 광소자들이 상용

화 되었으며 널리 사용되고 있음. 상용화된 비가역 소자들은 주로 페러데이 회전을 기반으로 설계되었으며, 해당 원리는 자기-광 결정을 필요로 함. 하지만 자기-광 결정은 집적화되기 어렵다는 단점이 있기 때문에 집적형 비가역 소자의 개발을 위해 새로운 원리를 기반으로 하는 집적 가능한 비가역 광소자에 대한 연구가 활발히 진행중임. 이미 다양한 광학 소자들이 칩 위에 집적 가능하도록 개발되었지만, 비가역 광소자는 아직까지 실제로 사용가능한 수준의 연구결과가 보고되지 않았음. 비가역 소자는 소스와 핵심 역할을 하는 광 회로 사이에 삽입되어야 하기 때문에 이들을 칩 위에 올리는 연구가 완료되지 않는다면 진정한 의미의 광 집적회로는 달성할 수 없다고 할 수 있음. 빛의 가역성을 위반하기 위해서는 자기-광 결정, 비선형매질, 시간에 따른 굴절률 변화 중 한가지 조건이 반드시 필요함. 따라서 집적형 비가역 소자의 개발을 위해서 비선형 공진구조 및 시간 변화하는 회절격자를 이용한 연구들이 진행되어왔다. 하지만 이들은 공진구조 및 모멘텀 매칭을 요구하기 때문에 매우 좁은 대역폭을 갖는다는 치명적인 단점이 있음. 이로 인해 여러가지 파장을 이용하는 회로에 적용하는 것은 불가하며, 심한 경우에는 온도변화에 의한 공진주파수 변화로 인해 정상적인 작동이 불가능하거나 초저온을 요구하는 연구결과도 있음.

이러한 문제점을 해소하기 위해 복소굴절률 분포를 이용한 비가역 소자를 제안하였음. 해당 소자는 광학계의 특이점 근방에서 나타나는 특이 동역학특성을 이용하여 시스템 변화에 매우 둔감한 형태로 빛의 가역성을 위반할 수 있음. 제안된 소자는 복소 굴절률의 공간변조를 갖는 광 도파도로 구성되어있으며, 이득포화(gain saturation)가 고려됨. 제안된 구조는 10 dB를 이상의 전후방 전송 비를 유지하면서 100 THz 이상의 초광대역 비가역 성능과 높은 순방향 전송 효율 (~100%)을 나타낸다는 큰 장점이 있음. 이러한 성능들, 특히 넓은 대역폭은 기존의 공진 구조를 이용한 비가역 소자에서는 얻을 수 없는 특성임. 넓은 대역폭은 펄스레이저 기반 신호처리를 위해서 반드시 필요한 비가역 소자의 조건임. 또한 제안된 구조는 칩 위에 구현 가능하며 따라서 광 집적회로의 구성에 사용될 수 있음. 비가역 광소자는 광 아이솔레이터와 광 순환기 등의 광 신호처리에 있어 필수적인 구성요소이며 칩 위에서 이를 구현하는 것은 광 집적회로 분야의 발전에 큰 역할을 할 것임. 이 결과는 2021년 3월에 중국 특허에 등록되었음.

송석호 교수 연구팀은 나노광소자기술 분야에서 탁월한 연구성과를 거두고 있음. 모든 광(光)통신 주파수 대역에서 작동이 가능한 광다이오드 소자를 세계 최초로 개발하는 등 나노기술(NT)과 정보통신기술(ICT)을 융합함으로써 차세대 광컴퓨터 및 신경회로망 구성에 핵심이 되는 나노광소자 구현 기술을 실용화 단계까지 발전시키고 있음.

송석호 교수는 종래의 광과학 분야에 열린 양자역학 이론 및 수학적 대칭성 또는 특이성을 도입하여 다양한 기존의 물리적 한계를 극복하려는 시도와 함께, 열린 양자역학이라는 이론을 실험적으로 검증하고 발전시키기 위한 새로운 광과학 영역을 개척하는 창의적 연구를 수행하고 있음.

## 2. 참여교수의 연구의 국제화 현황

### ① 국제적 학술활동 참여 실적 및 현황

#### 김은규 교수

- 2020년 국제학술대회 조직위원: “34<sup>th</sup> International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2020)”, Osaka, Japan (2020. 11. 9-12), Online
- 2020년 국제학술대회 조직위원: “11<sup>th</sup> International Conference on Quantum Dots (QD2020)”, Munich, Germany (2020. 12. 7-11)
- 2020년 국제학술대회 조직위원: “2020 International Conference on Solid State Devices and Materials”, virtual conference (2020. 9. 27-30)
- 국제 학술지 Science of Advanced Materials (American Scientific Publishers) 편집위원 (2008. 10. 1 - 현재)
- 국제 학술지 Applied Nano 편집위원 (2020. 1. 1 - 현재)

#### 김재용 교수

- 2021년 국제학술대회 조직위원장 (2021. 1. 1 - 12. 31): Conference Chair, “10<sup>th</sup> Asian Conference on High Pressure Research”, Virtual (2021. 11. 21-25), Online
  - The 19<sup>th</sup> International Conference on High Pressure Semiconductor Physics, The 3<sup>rd</sup> International Conference on High Pressure Study on Superconductors와 연계
  - 저차원 물질, 극한 물성, 위상 특성, 반도체, 수화물, 고압 바이오 물리, 계산 물리 등의 10개 세션으로 구성
  - 미국, 유럽, 일본, 중국에서 약 160명의 초청 연사 참여 예상
- 한국자기학회 학술지 편집위원 (2021. 1. 1 - 2022. 12. 31)
- 한국진공학회 이사 (2021. 1. 1 - 2022. 12. 31)
- 적정기술학회 국제협력, ODA 위원 (2021. 1. 1 - 2022. 12. 31)

#### 문순재 교수

- 2021년 국제학술대회 조직위원 (2021. 1. 1 - 12. 31): “10<sup>th</sup> Asian Conference on High Pressure Research”, Virtual (2021. 11. 21-25), Online

#### 정문석 교수

- 국제학술대회 조직위원: 총무, “International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications” (2020. 7. 19-23), Postponed

#### 조준형 교수

- 2021년 국제학술대회 조직위원 (2021. 1. 1 - 12. 31): “10<sup>th</sup> Asian Conference on High Pressure Research”, Virtual (2021. 11. 21-25), Online

#### 천상모 교수

- 2021년 국제학술대회 조직위원 (2021. 1. 1 - 12. 31): “10<sup>th</sup> Asian Conference on High Pressure Research”, Virtual (2021. 11. 21-25), Online.

## ② 국제 공동연구 실적

<표 3-8> 1차년도 국제 공동연구 실적

연번	공동연구 참여자		상대국 /소속기관	국제 공동연구 실적	DOI 번호/ISBN 등 관련 인터넷 link 주소
	교육연구팀 참여교수	국외 공동연구자			
1	김재용		중국/Yanshan University	Distance makes a difference in crystalline photoluminescence	10.1038/s41467-020-19377-6
2	김재용		중국/HPSTAR	Structural mechanism of glass forming ability in Zr-based binary alloys	10.1016/j.intermet.2020.106911
3	김재용		유럽/EuSFEL	Novel experimental setup for megahertz X-ray diffraction in a diamond anvil cell at the High Energy Density (HED) instrument of the European X-ray Free-Electron Laser (EuXFEL)	10.1107/S1600577521002551
4	김재용		유럽/Eu-XFEL	X-ray Free Electron Laser-Induced Synthesis of $\epsilon$ -Iron Nitride at High Pressures	10.1021/acs.jpcclett.1c00150
5	김재용		중국/Yangzhou University/HPSTAR/ Yanshan University	Structural transformation and transport behavior of mixed valence compound Sn3O4 under high pressure	10.1016/j.jallcom.2021.161197
6	김재용		체코/Czech Academy of Sciences	저차원 Formamidinium Lead Halide Perovskites 합성에 관한 연구	10.1002/adfm.202011093
7	문순재		미국/Univ. of California-Santa Barbara	Doping and temperature evolutions of optical response of Sr3(Ir1-xRux)2O7	10.1038/s41598-020-79263-5
8	정문석		미국/Old Dominion University	페로브스카이트 태양전지 특성 연구	10.1016/j.apsusc.2021.149852
9	조준형		폴란드/Czech, estochowa University of Technology	LaH10의 초전도성의 수소 동위원소의 영향에 대한 제일원리 연구	10.1002/andp.202000518
10	조준형		중국/중국과학기술대학(USTC)	Quasi-3D 그래핀 구조 설계를 위한 자발적 접이식 성장 방법에 관한 연구	10.1021/acs.nanolett.0c04596
11	조준형		중국/허난대학교	이차원 전자화물에서의 강자성 바일 페르미온 연구	10.1103/PhysRevLett.125.187203
12	조준형		중국/중국과학기술대학(USTC)	h-BN 위에 그래핀을 성장하는 방법에 대한 연구	10.1021/acs.nanolett.0c04596
13	조준형		중국/후단대학교, 중국과학기술대학	반강자성 카고메 격자에서의 디락 페르미온 연구	10.1103/PhysRevB.102.155103

### ③ 외국 대학 및 연구기관과의 연구자 교류 실적 및 계획

외국기관과의 연구자 교류를 통한 국제화는 본 학과가 발전하기 위한 3대 핵심전략 중 하나임. 국제화를 통해 거의 고착화된 국내 대학/학과 서열을 극복하고 외국 연구자들과의 교류를 넓히고 우수인력을 확보하여 해외 우수연구기관들과의 국제공동연구를 통하여 세계적인 연구성과를 도출할 수 있음. 특히 극한물성연구처럼 국내보다 해외, 특히 중국에 연구인력과 인프라가 많이 구축되어 있는 현실에서는 더욱 그러함. 국내 물리학과 대학원 진학률이 저조하고 젊은 과학자가 부족한 현실에서, 인적자원이 풍부한 중국, 베트남과의 교류는 매우 중요. 이러한 배경에서 본 사업팀은 중국북경고압연구소와 길림대학 등을 비롯한 여러 기관들과 연구와 교육면에서 전략적 파트너십을 수립하였으며, 공동 워크샵을 정기적으로 개최하고 있음.

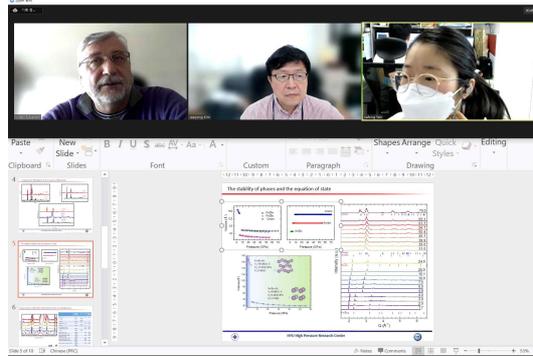
#### ❖ 외국 대학 및 연구 기관과의 연구자 교류 실적

- The 1<sup>st</sup> Workshop on Quantum Material under Extreme Conditions 개최 (2020. 11. 27.)
  - 극한 환경에서 양자물질이 보이는 물성 연구에 대한 워크샵 개최
  - 한양대학교 양자물질 극한물성 교육연구팀, 중국 HPSTAR, 미국 카네기 연구소가 주관하는 The 4<sup>th</sup> HYU-HPSTAR-CIS and Korea-China Symposium on High Pressure와 결합하여 개최
  - 한국과 중국의 초청연사 11명 참여
  - 줌 온라인 참가자 약 100명, 중국 베이징/상하이 고압연구소 현장 참여 약 100명
  - 극한 환경에서 양자물질이 보이는 물성 연구에 대한 워크샵 개최
  - 국내 초청 연사 6명, 중국 초청 연사 5명 발표
  - 줌 온라인 참가자 약 100명, 중국 베이징/상하이 고압연구소 현장 참여 약 100명
  - 다양한 양자 물질이 초저온 또는 초고압 상태에서 보이는 새로운 물성에 대한 연구 결과 발표 및 공동 연구 아이디어 논의
- 김재용 교수 연구실                      학생 장기 연수
  - 중국, Yanshan University의                      박사 연구실과의 공동 연구
  - 김재용 교수 연구실의                      학생은 고압물성연구관련 해외공동연구자인 박사 (중국 HPSTAR, Yanshan University) 연구실을 2021.1월 27일 부터 2월 23까지 28일 동안 장기방문하여 다이아몬드 앤빌셀을 이용한 C60 m-xylene의 초고압에서의 물성연구를 수행하였음. 풀러린으로 이루어진 C60의 압력과 온도에 따른 전기전도도와 구조변화를 측정함으로써 M-SM전환을 확인하였고, 특히 동일한 조건에서도 앤빌셀의 위치에 따라 압력이 균일하지 않음을 C60시료의 TEM 분석을 직접 진행하였고 이러한 결과를 종합하여 Carbon에 투고하였음.
- 정문석 교수 연구실: 미국 Old Dominion University,                      연구실과의 공동 연구 및 논문발표
  - 2020년 7월부터 2021년 8월까지 미국 Old Dominion University에 있는                      교수 연구실과 페로브스카이트 태양전지에 대한 공동연구 및 논문 발표 (Appl. Surf. Sci. 558, 149852 (2021))
- 김재용 교수 연구실 중국 Yanshan University,                      교수 연구실과의 공동 연구
  - 2021년 1월부터 2021년 2월까지, 중국 Yanshan University의                      교수와 압력 관련 연구방향 설정 및 학과 연구방향 컨설팅 진행함.
  - 초고압 연구관련 중국에서 새롭게 부상하고 있는 Yanshan 대학교의 Center for High Pressure Science (CHiPS) 와 Metastable Materials Science and Technology State Key Laboratory에 연구대학원생을 파견하여 그곳 책임교수인                      교수연구실과 초고압, 초고온기반 극한환경연구를 공동으로 수행하고 대학원생을 교류하기로 하였음. 그 일환으로 김재용교수 연구실의 박사과정생                      학생을 1개월간 파견하였고, Yanshan 대학교 출신의                      학생을 본 연구실에서 수련할 계

획입. 본 공동연구를 위하여 차년도 협약을 목표로 양 기관 MoU를 준비 중임.

- 보다 적극적인 공동 연구를 위해 교수를 본 학과의 겸임교수로 발령하여, 대학원생들의 연구를 공동으로 지도하고 있으며, 학생의 논문을 전문학술지 Carbon에 투고하였음.

- 김재용 교수 연구실 중국 HPSTAR 소속 박사와 공동 연구 수행



- 고압을 이용한 potassium hydride 관련 연구를 수행하고 있는 참여대학원생 학생의 연구를 김재용 교수와 공동으로 지도하고 있으며, 곧 연구 결과를 학술지에 투고할 예정임.

- 중국 연산대학교 (Yanshan University) 이과대학 (School of Science)와 공동 연구와 학생 교류를 위한 MoU 체결 (2021년 1월 4일)

**Memorandum of Understanding**  
Between  
School of Science, Yanshan University, Qinhuangdao,  
P.R. China  
and  
Department of Physics, Hanyang University, Seoul, Korea

This Memorandum of Understanding (hereinafter referred to as "MoU") is made between the School of Science at Yanshan University, having its principal address at No. 438 West Hebei Avenue, Qinhuangdao, Hebei Province, 066094, P.R.China, and Physics Department of Hanyang University, having its principal address at 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, 04467, Republic of Korea, and collectively hereinafter referred to as "Parties" and individually as the "Party".

This MoU is intended to form the foundation for further exchanges between the Parties and is not intended to create legally binding obligations of either Party. The specific terms of cooperation for each activity under this MoU shall be mutually discussed and agreed upon in the future, should the need arise, and shall be subject to appropriate and separate agreements, in conformity with the policies, guidelines and processes in place.

The Parties therefore wish to state the following:

**Common Objectives and Vision**

The Parties agree to promote excellence through multidisciplinary and multi-institutional collaborations in order to build a partnership consistent with the strategic goals and values of both institutions. The present MoU aims to explore in further details the establishment of research cooperation between School of Science at Yanshan University, and Department of Physics at Hanyang University in conducting research and coordinating academic discussions on forefront research topics of high pressure physics.

**Understanding**

The Parties agree that the means for achieving the objectives of this MoU include, but are not limited to:

- 1. Mobility of professors and research personnel**
  - Exchange scientific and technical information including delivering lectures and holding joint seminars and symposia;
  - Invite researchers from both institutions for short or longer stays or substantial in one respective laboratories to develop collaborative projects or to be trained in specialized techniques; and
  - Develop an exchange program for staff, doctoral students and post doctoral fellows between the two Parties. Such exchange programs shall be the subject of a separate agreement.
- 2. Application of external research funding**
  - Encourage scientists to develop joint research projects and make applications to national and international funding agencies supporting work in areas of mutual interest; and
  - Explore other opportunities for alliances between the two Parties.
- 3. Production and dissemination of knowledge**
  - Facilitate the application, exchange and general dissemination of research results;
  - Participate in seminars and academic meetings, subject to financing from an internal source or an external granting agency; and
  - Promote international research experience/training for graduate students, post doctoral fellows and staff within each other's institutions. Part of such program could be extended to the co-supervision of trainees associated to a joint research project, with prior approval from the Parties.

**Intellectual Property**

The MoU imposes no binding obligation on either Party (financial or otherwise) joint activities that require funding (e.g. travel and housing costs, laboratory material and supplies) should not be initiated before the necessary resources have been secured.

Each Party agrees not to use the other's name or logo in publicity without written consent from the senior executive of the other Party or his/her designate. The Intellectual Property policies in place at each institution shall apply to the activities initiated and implemented by the respective researchers.

**Publication**

The Parties shall jointly publish the results.

**Terms and Validity**

- This MoU shall become effective from the date of its signing and shall remain in force for a period of five (5) years. The Parties further agree that any dispute between the Parties will be settled as amicably as possible.
- This MoU is established in two copies and is executed in English.

The parties have signified their acceptance of this MoU herein by signing below and each will retain one duplicate text of equal authenticity.

*Gwanggil Lee*  
Gwanggil Lee, Ph. D.  
Professor and Chairperson  
Department of Physics  
Hanyang University, Seoul, ROK

Date: Dec 24, 2020

Wang Ming D.  
Prof. Ming Diao  
School of Science  
Yanshan University, Qinhuangdao, China

Date: Jan 4th

[중국 연산대학교 이과대학과 한양대학교 물리학과와의 MOU]

❖ 외국 대학 및 연구 기관과의 연구자 교류 계획

- MoU 협정체결 기관들과의 국제협력 계획
  - 중국 길림대학 (Jilin University)의 State Key Laboratory of Superhard Materials 소속 박사를 본 연구팀 신진연구인력으로 채용하여 (2021. 10월 1일자 발령 예정) 길림대학교와의 국제교류원으로 활용할 예정임.
  - Yanshan 대학교의 교수 연구실의 대학원생을 김재용교수 연구실에 파견하여 공동연구를 수행할 예정이며, 학위취득후 본 연구팀에서 신진연구인력으로 활용할 예정임.
  - MoU기반 중국의 우수대학원생을 본 학과 대학원생으로 유치하여 국내연구인력의 공백을 대신 할 수 있도록 할 것임.



Ⅲ

4단계 BK21 교육연구단(팀) 관련 언론보도 리스트

교육연구단(팀)명	양자물질 극한물성 교육연구팀
교육연구단(팀)장명	김재용

연번	구분	언론사명 /수상기관 등	보도일자/ 수상일자 등	제목/ 수상명 등	관련 URL
		주요내용 (200자이내)			
1	성과	전자신문 외 4건	21.08.24	반도체 소모전력 줄이는 에너지저감기 술개발	<a href="https://www.etnews.com/20210824000128">https://www.etnews.com/20210824000128</a>
		Nano Energy 논문 게재 보도자료 (정문석 교수)			
2	수상	한양대학교 산학협력단	21.07.20	노안보정용 다초점 인공수정체	<a href="http://research.hanyang.ac.kr/certi/awards.php">http://research.hanyang.ac.kr/certi/awards.php</a>
		제4회 HY-Innovation Awards 최우수상 (송석호 교수)			
3	수상	홍진표 교수 석학교수 선정 (2021. 3. )			

❖ 교육연구팀의 수월성 및 탁월성 달성을 위한 노력

- 본 교육연구팀의 비전인 극한물성분야의 창의적 연구인재를 양성하기 위해서, 교육위원회를 조직하고, 교육과정과 학사과정이 계획대로 진행될 수 있도록 함.
- 교육목표 달성을 위한 교과과정 개편
  - 본 교육연구팀의 교육목표에 맞추어, 대학원 교과과정을 기초, 핵심, 심화, 특성화, 그리고 공통과목으로 개편하고, 1차년도에는 10과목, 25학점 운영.

	기초	핵심	심화	특성화	공통과목
1년간 운영된 교과목	2과목 (6학점)	1과목 (3학점)	4과목 (12학점)	1과목 (3학점)	1과목 (1학점)

• BK 세미나를 통한 최신 연구 동향 습득

매주 BK 세미나를 열고 전문가들을 초청하여, 대학원생이 최신 연구 동향을 습득할 수 있도록 하였음. 2020년 10월 15일부터 2021년 8월 27일까지 총 47회 실시.



[대면 및 비대면 BK 세미나 (코로나 방역 지침 준수함)]

• BK 성과발표회

매년 2회(1월, 7월)의 BK 성과발표회를 통해서 대학원생들의 연구를 공유하고, 우수 연구를 수행한 대학원생에게 최우수상, 우수상, 장려상을 수여하고 장학금을 지급하였음.

**양자물성 극한물성 교육연구팀 1차년도 성과 발표회**

2020 BKFOUR  
양자물성 극한물성 교육연구팀  
1차년도 성과 발표회

2021년 1월 28일(목)  
14:00 - 16:00  
자연과학관 330호 (최희정 교수 온라인 중계)  
https://www.youtube.com/watch?v=...

시각	발표자	제목
14:00-14:15	김기영	Structural and thermal stability of ultra-thin Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> film
14:15-14:30	김민준	Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> thin film grown by spin coating method
14:30-14:45	김민준	Structural characterization of large-scale Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> thin film grown by spin coating method
14:45-15:00	김민준	High quality Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> thin film grown by spin coating method
15:00-15:15	김민준	Structural characterization of large-scale Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> thin film grown by spin coating method
15:15-15:30	김민준	High quality Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> thin film grown by spin coating method
15:30-15:45	김민준	Structural characterization of large-scale Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> thin film grown by spin coating method
15:45-16:00	김민준	High quality Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> thin film grown by spin coating method

**양자물성 극한물성 교육연구팀 2차년도 성과 발표회**

2021-1 BKFOUR  
양자물성 극한물성 교육연구팀  
2차년도 성과 발표회

2021년 7월 30일(금) 14:00  
온라인 중계(ZOOM)  
회의 ID : 834 6350 2050  
회의 암호 : 211807

시각	발표자	제목	지도교수
14:00-14:15	김민준	Structural and thermal stability of ultra-thin Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> film	김민준
14:15-14:30	김민준	Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> thin film grown by spin coating method	김민준
14:30-14:45	김민준	Structural characterization of large-scale Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> thin film grown by spin coating method	김민준
14:45-15:00	김민준	High quality Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> thin film grown by spin coating method	김민준
15:00-15:15	김민준	Structural characterization of large-scale Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> thin film grown by spin coating method	김민준
15:15-15:30	김민준	High quality Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> thin film grown by spin coating method	김민준
15:30-15:45	김민준	Structural characterization of large-scale Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> thin film grown by spin coating method	김민준
15:45-16:00	김민준	High quality Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> thin film grown by spin coating method	김민준

[2021년 1월 28일, 2021년 7월 20일 1차년도 및 2차년도 성과 발표회]



[2021년 1월 28일, 2021년 7월 20일 장학금수여식]

❖ 대학원생 연구 성과의 우수성

- IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수 3편
- 환산보정 IF 합 3.59: 1단계 (3년) 목표치의 1/3 달성. 2017 - 19 대비 8% 증가
- 환산보정 ES 합 16.00: 1단계 (3년) 목표치의 2/3 달성. 2017 - 19 대비 126% 증가
- 1차년도 참여대학원생 논문 18편: 2017 -19 연평균 (15.7편) 대비 14% 증가

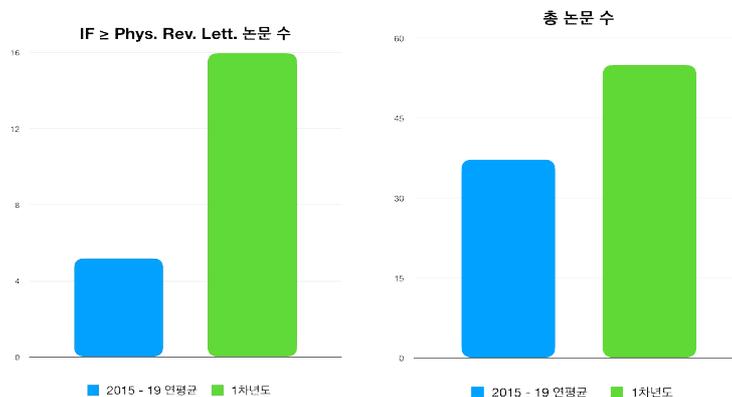
- BK 선정 평가 시 제시한 1단계 참여대학원생 연구실적 목표
  - IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수 6편
  - 환산보정 IF 합 매년 10% 증가
  - 환산보정 ES 합 매년 10% 증가
- 참여대학원생의 1차년도 연구실적을 통해 본 교육연구팀 참여대학원생의 연구역량이 계획한 대로 향상되고 있음을 알 수 있음.

	1차년도	2017-19 연평균	1단계 목표 (3년) (2020.9-2022.9)
IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수	3	1.67	6
환산보정 IF 합	3.59	3.31	10.92
환산보정 ES 합	16.00	7.09	23.40

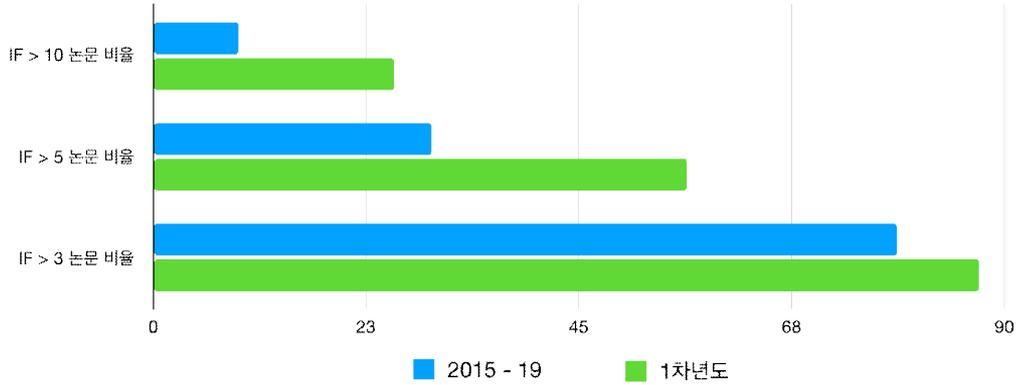
❖ 참여교수 논문실적의 우수성

- 1차년도 참여교수들의 발표논문 55편, IF 합 485.626
- IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수 16
- IF > 10.0 논문수: 14편 (25.5%), IF > 5.0 논문 수: 31 (56.4%), IF > 3.0 논문 수: 48 (87.3%)

- 총 논문 수: 2015 - 2019년 논문 수 연평균 (37편) 대비 48% 증가
- IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수: 2015 - 19 연평균 대비 207% 증가



- 우수 논문 비율
  - IF > 10 논문 비율: 2015 - 2019년 대비 183% 증가
  - IF > 5 논문 비율: 2015 - 2019년 대비 92% 증가. 목표치 (≥ 40%) 초과
  - IF > 3 논문 비율: 2015 - 2019년 대비 11% 증가



• 1차년도 연구성과 세부지표

	1차년도	2015-19 연평균	증감 (%)	1단계 목표(~ 2023)
IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수	16	5.2	+207	28
IF > 5 논문 비율 (%)	56	29	+93	35
환산보정 IF 합	8.35	5.31	+57	17.52
환산보정 ES 합	21.57	20.05	+7	66.17

- IF ≥ Phys. Rev. Lett. 논문 수: 2015 - 2019 연평균 대비 2.88배, 1단계 목표치의 53.6% 달성
- IF ≥ 5인 논문의 비율 59%: 2015 - 19 대비 약 2배
- 환산보정 IF 합: 1단계 목표치의 48% 달성
- 환산보정 ES 합: 1단계 목표치의 33% 달성, 현 상태를 유지한다면 목표를 초과 달성할 것으로 예상됨.

❖ 참여교수 연구비 수주실적

	1차년도	2015-19 연평균	증감 (%)
연구비 총액 (천원)	3,721,926	1,970,844	+88
1인당 연구비 (천원)	413,547	281,549	+46

- 1차년도 연구비 총액 3,721,926,267원, 참여교수 1인당 연구비 413,547,363원
- 2017-2019년 연평균 연구비 대비 연구비 총액 82%증가, 1인당 연구비 총액 42% 증가
- 해외 연구비 수주: 미국 공군 연구소 (Asian Office of Aerospace Research and Development)

❖ 참여교수 특허실적

	1차년도	2015-19
국제특허 (건)	5	5
국내특허 (건)	5	2



- 외부 평가위원 1:            교수, 부산대학교 물리학과
- 외부 평가위원 2:            교수, 광주과학기술원 물리·광과학과

평가 등급 분류표 (절대평가, 5단계 Likert 척도 등급)

등급	의미	종합점수
매우 우수 (S)	전반적으로 사업내용, 목표달성도, 사업성과 등이 성공적으로 추진 (목표량을 90%이상 달성)	90점 이상
우수 (A)	부분적으로 사업내용, 목표달성도, 사업성과 등이 성공적으로 추진 (목표량을 80%이상 달성)	80점 이상
보통 (B)	사업내용, 목표달성도, 사업성과 등이 적절하게 추진(목표량의 70%이상 달성)	70점 이상
미흡 (C)	부분적으로 사업내용, 목표달성도, 사업성과 등의 개선·보완 필요 (목표량을 60%이상 달성)	60점 이상
매우 미흡 (D)	전반적으로 사업내용, 목표달성도, 사업 성과 등의 개선·보완 필요(목표량을 50% 이상 달성)	60점 미만

부문	평가 지표	평가등급
비전 및 목표	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 교육연구팀장의 연구·교육·행정 역량</li> <li>◎ 교육연구팀 참여인력 구성 및 현황의 적절성</li> <li>◎ 교육연구팀의 비전 및 목표 대비 실적</li> <li>◎ 신청서에 작성된 저명대학 벤치마킹 대상과의 비교 분석</li> <li>◎ 교육연구팀의 비전 및 목표 달성의 애로점에 대한 자체 노력</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> 비전 및 목표 부문 평가 의견</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 교육연구팀의 비전과 목표에 대한 설정이 잘 되어 있음</li> <li>- 교육과정을 4단계(기초, 핵심, 심화, 특성화)로 분류한 것으로 보이는데 심화와 특성화의 차이점에 대해서 명확하지 않음, 본 교육연구팀의 비전을 달성화하기 위한 특성화로 이해가 되지만, 실제 과목(자체평가보고서 11페이지)은 교육연구팀의 특성화와는 상의하게 보임.</li> <li>- 더욱 지속적인 성장을 위한 해당 교육연구팀의 분석이 추가로 필요할 것으로 보임</li> </ul>	<input type="checkbox"/> 매우 우수 <input checked="" type="checkbox"/> 우수 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 미흡 <input type="checkbox"/> 매우 미흡
교육역량	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 교육과정 구성 및 운영 현황과 계획</li> <li>◎ 과학기술산업사회 문제 해결과 관련된 교육 프로그램 현황과 구성 및 운영 계획</li> <li>◎ 최근 1년간 대학원생 인력 확보 및 배출 실적</li> <li>◎ 교육연구팀의 우수 대학원생 확보 및 지원 계획</li> <li>◎ 참여대학원생의 취(창)업의 실적 우수성</li> <li>◎ 참여대학원생 연구실적(논문, 학술대회, 특허, 취창업)의 우수성</li> <li>◎ 신진연구인력 현황 및 실적</li> <li>◎ 참여교수의 교육역량 대표실적</li> <li>◎ 교육의 국제화 전략(프로그램의 국제화 전략, 국제공동연구 현황 및 계획)</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> 교육역량 부문 평가 의견</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 정규과목이 기초, 핵심, 심화, 실험연계라고 언급되어 있고, 특성화 과목에 대한 언급은 부족해 보임. 다양한 분류보다는 일관성이있는 분류가 필요함. 특히, IC-PBL 과목 실제 교육연구팀의 비전달성과의 연계성이 다소 부족함</li> <li>- 참여대학원생의 연구실적은 매우 우수하고, 성과발표회 및 세미나 등의 운영도 매우 우수함</li> <li>- 어려운 시기임에도 불구하고 국제화 실적은 매우 우수함</li> <li>- 국제교류실적과 학술활동실적을 구별해서 작성할 필요가 있음.</li> </ul>	<input type="checkbox"/> 매우 우수 <input checked="" type="checkbox"/> 우수 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 미흡 <input type="checkbox"/> 매우 미흡
연구역량	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 참여교수의 연구비 수주 실적</li> <li>◎ 참여교수 연구업적물의 우수성</li> <li>◎ 교육연구팀의 학문적 수월성을 대표하는 연구업적물</li> <li>◎ 참여교수 특허, 기술이전, 창업 실적의 우수성</li> <li>◎ 참여교수의 산업·사회에 대한 기여도</li> <li>◎ 참여교수의 연구 국제화 현황(학술활동, 국제 공동연구, 교류 실적 및 계획)</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> 연구역량 부문 평가 의견</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 사업단장을 중심으로 한 참여연구팀의 국제화는 매우 우수함</li> <li>- 지표면에서는 모두 향상된 것을 보여줌. 이러한 향상된 지표가 차년도에서 계속 이어질 수 있도록 하는 추가적인 전략이 필요함</li> <li>- 특히, 우수한 대표 연구 업적 향상을 위한 협업체제(공동연구), 융복합연구 활성화를 고려해볼 필요가 있음</li> </ul>	<input checked="" type="checkbox"/> 매우 우수 <input type="checkbox"/> 우수 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 미흡 <input type="checkbox"/> 매우 미흡
<b>종합평가 의견</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 참여교수들과 참여 학생의 연구성과를 비교해보면 학생들의 연구실적이 33%정도 (18편/55편)를 이루고 있음. 이러한 차이를 줄일 수 있는 지속적인 노력이 필요함.</li> <li>- 대학의 다양한 비교과 프로그램과의 연계성을 조금 더 높여, 실제 대학의 많은 (다양한) 지원이 학생들의 학문적인 성장에 도움이 될 수 있도록 하는 추가적인 노력이 필요함</li> </ul>		
외부 평가위원	성명 	종합 평가 등급 <span style="float: right;">매우 우수</span>

부문	평가 지표	평가등급		
비전 및 목표	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 교육연구팀장의 연구·교육·행정 역량</li> <li>◎ 교육연구팀 참여인력 구성 및 현황의 적절성</li> <li>◎ 교육연구팀의 비전 및 목표 대비 실적</li> <li>◎ 신청서에 작성된 저명대학 벤치마킹 대상과의 비교 분석</li> <li>◎ 교육연구팀의 비전 및 목표 달성의 애로점에 대한 자체 노력</li> </ul> <p><b>□ 비전 및 목표 부문 평가 의견</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연구팀장은 뛰어난 연구 및 교육역량으로 연구단 조직을 잘 운영하고있는 것으로 판단됨.</li> <li>- 교육단의 목적인 극한물성분야 창의인재양성을 위한 교육과정 개편 및 교육위원회 조직을 통해 연구단의 비전을 구체화하는 노력이 돋보임.</li> </ul>	<input type="checkbox"/> 매우 우수 <input checked="" type="checkbox"/> 우수 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 미흡 <input type="checkbox"/> 매우 미흡		
교육역량	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 교육과정 구성 및 운영 현황과 계획</li> <li>◎ 과학기술산업·사회 문제 해결과 관련된 교육 프로그램 현황과 구성 및 운영 계획</li> <li>◎ 최근 1년간 대학원생 인력 확보 및 배출 실적</li> <li>◎ 교육연구팀의 우수 대학원생 확보 및 지원 계획</li> <li>◎ 참여대학원생의 취(창)업의 질적 우수성</li> <li>◎ 참여대학원생 연구실적(논문, 학술대회, 특허, 취창업)의 우수성</li> <li>◎ 신진연구인력 현황 및 실적</li> <li>◎ 참여교수의 교육역량 대표실적</li> <li>◎ 교육의 국제화 전략(프로그램의 국제화 전략, 국제공동연구 현황 및 계획)</li> </ul> <p><b>□ 교육역량 부문 평가 의견</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연구단의 목적에 부합하는 미래창의인력양성을 위해 교육과정을 체계적으로 개편/운영함.</li> <li>- BK 성과발표회 및 BK 관련 장학금/포상 수여를 통한 연구장려는 학생격려와 동시에 학생들의 적극적 참여를 끌어내는 좋은 행사로 평가됨.</li> <li>- 1년의 평가기간임에도 불구하고 대학원생 연구실적은 모든 면(논문 편수 및 IF)에서 연구단 개시이전보다 향상하고 있으며 2023년 1단계 목표를 완수할 수 있을 것으로 평가됨.</li> <li>- 우수 신진연구인력(연구원) 확보를 위해 노력하고 있는 점이 보이며 다음 평가기간에는 문제없이 목적을 이룰 것으로 평가됨.</li> <li>- 코로나 사태에도 불구하고 활발한 국제화 교육프로그램을 수행하였으며 참여대학원생들의 인적교류 및 연구실적도 우수한 것으로 평가됨.</li> </ul>	<input type="checkbox"/> 매우 우수 <input checked="" type="checkbox"/> 우수 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 미흡 <input type="checkbox"/> 매우 미흡		
연구역량	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 참여교수의 연구비 수주 실적</li> <li>◎ 참여교수 연구업적물의 우수성</li> <li>◎ 교육연구팀의 학문적 수월성을 대표하는 연구업적물</li> <li>◎ 참여교수 특허, 기술이전, 창업 실적의 우수성</li> <li>◎ 참여교수의 산업·사회에 대한 기여도</li> <li>◎ 참여교수의 연구 국제화 현황(학술활동, 국제 공동연구, 교류 실적 및 계획)</li> </ul> <p><b>□ 연구역량 부문 평가 의견</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2명의 교원확보를 통해 교육 및 연구역량을 강화하였으며, 참여교수 논문의 경우 모든 분야(논문편수 및 IF)에서 증가추세에 있음. 특히, IF가 높은 양질의 논문수가 증가하면서 연구의 질적인 수준이 향상되고 있음을 확인할 수 있음.</li> <li>- 참여교수의 연구비 수주는 현저하게 증가하였으며, 국내외 특허실적 또한 우수성이 인정됨.</li> <li>- 참여교수들의 국제공동연구현황은 다양한 국가에서 매우 활발하게 수행되고 있으며 공동연구실적 또한 매우 우수한 것으로 확인됨.</li> </ul>	<input type="checkbox"/> 매우 우수 <input checked="" type="checkbox"/> 우수 <input type="checkbox"/> 보통 <input type="checkbox"/> 미흡 <input type="checkbox"/> 매우 미흡		
<b>종합평가 의견</b>				
<p>- 사업단이 지향하는 미래 극한물성분야 창의인재양성배출을 위해 효과적인 교육과정을 제시하고 있는 것으로 판단되며, 참여대학원생과 교수들의 연구실적은 매우 우수한 것으로 평가됨. 연구성과의 모든 세부지표가 향상되고 있음을 파악할 수 있으며 연구단의 목표달성에는 전혀 문제가 없을 것으로 판단됨.</p>				
외부 평가위원	성명		종합 평가 등급	우수