

1. 서론

최근 국제적인 환경 문제들과 나날이 증가해 가는 에너지 생산비용 때문에 태양력, 풍력, 수력 발전 등 탄소를 배출하지 않는 전기 에너지 생산에 관한 연구가 활발해지고 있다. 특히 태양광 발전은 자연환경에 구애를 받지 않고 햇빛이 비치는 곳이면 어디 곳에서도 설치가 가능하므로 전 세계적으로 매우 활발한 연구가 진행되고 있는 분야이다. 태양광 발전의 핵심 구성요소인 solar cell은 태양에서 지구로 전파되는 복사에너지를 흡수하여 이를 전류로 변환하는 photovoltaic device를 이용하여 구현한다. 이 에너지 변환 효율을 올리고 제작하는데 드는 비용을 낮추는 것이 태양광 발전 연구의 최대의 목표이다.

multijunction으로 (또는 tandem 방식으로) cell을 제작하는 경우 상대적으로 저렴한 silicon이나 organic 물질을 기반으로 하는 solar cell 대비 효율이 높지만, 제조비용이 많이 들기 때문에 아직 시장에서 광범위하게 받아들여지고 있지는 않다. 단위 면적의 원가 당 전력을 고려한다면, 현재 어떠한 방식의 solar cell이 시장에서 우월한 지에 대한 결론을 내는 것은 아직 시기상조라 볼 수 있다.

Photovoltaic device에서 일어나는 물리적인 단계는 크게 세 가지로 나눌 수 있는데, 우선 (1) 태양에서 오는 복사파를 흡수하고, (2) device의 흡수층에서 흡수한 에너지를 이용 속박된 전자를 자유전자로 (또는 속박된 정공을 자유정공으로) 변환하며, (3) 만들어진 자유전자나 자유정공이 device 내에 존재하는 전위를 따라 확산하면서 하면서 생성된 DC 전류를 전력으로 뽑아내는 단계로

특집 | SPP

Plasmonic Solar Cell

이장원 *

Solar cell 효율의 2010년 말 공인 세계 기록은 표 1에 서와 같이 집광렌즈를 달지 않을 경우 미국 Spectrolab 사가 GaInP/GaAs/Ge로 2003년 1월 공인 받은 32.0%이다.

집광렌즈를 사용하는 경우는 표 2와 같이 역시 동일한 회사에서 2009년 8월 공인 받은 GaInP/GaInAs/Ge를 사용한 41.6%이다. [1] 이러한 다양한 물질을 이용하여

기술할 수 있다. - (1)번과 (2)번 단계 사이에 흡수된 복사 에너지가 전자와 정공의 속박상태인 exciton을 형성하는 과정이 있는데 편의상 (1)번 단계에 포함시킨다. - 단위 면적당 전기에너지가 만들어지는 효율을 올리기 위해서는 이 세 가지 단계가 모두 최적화 되어야만 하는데 Plasmonics를 이용하는 solar cell의 연구는 주로 첫째 단계에 대한 최적화를 목표로 하고 있다.

* 삼성종합기술원

Plasmonic Solar Cell

표 1. 상온 25°C에서 global AM1.5 (1000W/cm²) 태양 복사 스펙트럼에 대한 solar cell 효율 : 집광렌즈를 사용하지 않는 경우 (출처 : 참고문헌 1)

Classification ^a	Effic. ^b (%)	Area ^c (cm ²)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF ^d (%)	Test centre ^e (and date)	Description
Silicon							
Si (crystalline)	25.0 ± 0.5	4.00 (da)	0.706	42.7	82.8	Sandia (3/99) ^f	UNSW PERL [17]
Si (multicrystalline)	20.4 ± 0.5	1.002 (ap)	0.664	38.0	80.9	NREL (5/04) ^f	FhG-ISE [18]
Si (thin film transfer)	16.7 ± 0.4	4.017 (ap)	0.645	33.0	78.2	FhG-ISE (7/01) ^f	U. Stuttgart (45 μm thick) [19]
Si (thin film submodule)	10.5 ± 0.3	94.0 (ap)	0.492 ^g	29.7 ^g	72.1	FhG-ISE (8/07) ^f	CSG Solar (1–2 μm on glass; 20 cells) [20]
III–V Cells							
GaAs (thin film)	26.1 ± 0.8	1.001 (ap)	1.045	29.6	84.6	FhG-ISE (7/08) ^f	Radboud U. Nijmegen [21]
GaAs (multicrystalline)	18.4 ± 0.5	4.011 (t)	0.994	23.2	79.7	NREL (11/95) ^f	RTI, Ge substrate [22]
InP (crystalline)	22.1 ± 0.7	4.02 (t)	0.878	29.5	85.4	NREL (4/90) ^f	Spire, epitaxial [23]
Thin Film Chalcogenide							
CIGS (cell)	19.4 ± 0.6 ^h	0.994 (ap)	0.716	33.7	80.3	NREL (1/08) ^f	NREL, CIGS on glass [24]
CIGS (submodule)	16.7 ± 0.4	16.0 (ap)	0.661 ^g	33.6 ^g	75.1	FhG-ISE (3/00) ^f	U. Uppsala, 4 serial cells [25]
CdTe (cell)	16.7 ± 0.5 ^h	1.032 (ap)	0.845	26.1	75.5	NREL (9/01) ^f	NREL, mesa on glass [26]
Amorphous/Nanocrystalline Si							
Si (amorphous)	9.5 ± 0.3 ⁱ	1.070 (ap)	0.859	17.5	63.0	NREL (4/03) ^f	U. Neuchatel [27]
Si (nanocrystalline)	10.1 ± 0.2 ^j	1.199 (ap)	0.539	24.4	76.6	JQA (12/97)	Kaneka (2 μm on glass) [28]
Photochemical							
Dye sensitised	10.4 ± 0.3 ^k	1.004 (ap)	0.729	22.0	65.2	AIST (8/05) ^f	Sharp [29]
Dye sensitised (submodule)	8.5 ± 0.3 ^k	17.13 (ap)	0.669 ^g	18.9 ^g	67.1	AIST (6/09) ^f	Sony, 8 serial cells [4]
Organic							
Organic polymer	5.15 ± 0.3 ^k	1.021 (ap)	0.876	9.39	62.5	NREL (12/06) ^f	Konarka [30]
Organic (submodule)	3.5 ± 0.3 ^k	208.4 (ap)	8.620	0.847	48.3	NREL (7/09)	Solarmer [5]
Multijunction Devices							
GaInP/GaAs/Ge	32.0 ± 1.5 ^j	3.989 (t)	2.622	14.37	85.0	NREL (1/03)	Spectrolab (monolithic)
GaInP/GaAs	30.3 ^j	4.0 (t)	2.488	14.22	85.6	JQA (4/96)	Japan Energy (monolithic) [31]
GaAs/CIS (thin film)	25.8 ± 1.3 ^j	4.00 (t)	—	—	—	NREL (11/89)	Kopir/Boeing (4 terminal) [32]
a-Si/μc-Si (thin submodule) ^{ll}	11.7 ± 0.4 ^{ll}	14.23 (ap)	5.462	2.99	71.3	AIST (9/04)	Kaneka (thin film) [33]
Organic (2-cell tandem)	6.1 ± 0.2 ^k	1.989	1.589	6.18	61.9	FhG-ISE (7/09)	Heliatek [6]

^a CIGS, CuInGaSe₂; a-Si, amorphous silicon/hydrogen alloy.

^b Effic., efficiency.

^c (ap), aperture area; (t), total area; (da), designated illumination area.

^d FF, fill factor.

^e FhG-ISE, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme; JQA, Japan Quality Assurance; AIST, Japanese National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

^f Recalibrated from original measurement.

^g Reported on a 'per cell' basis.

^h Not measured at an external laboratory.

ⁱ Stabilised by 800 h, 1 sun AM1.5 illumination at a cell temperature of 50°C.

^j Measured under IEC 60904-3 Ed. 1: 1989 reference spectrum.

^k Stability not investigated.

^{ll} Stabilised by 174 h, 1 sun illumination after 20 h, 5 sun illumination at a sample temperature of 50°C.

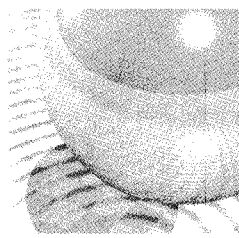


표 2. 상온 25°C에서 global AM1.5 (1000W/cm²) 태양 복사 스펙트럼에 대한 solar cell 효율 : 집광렌즈를 사용하는 경우 (출처 : 참고문헌 1)

Classification	Effic. ^a (%)	Area ^b (cm ²)	Intensity ^c (suns)	Test centre (and date)	Description
Single Cells					
GaAs	28.8 ± 1.2 ^d	0.0504 (da)	232	FhG-ISE (1/09)	Fraunhofer ISE
Si	27.6 ± 1.0 ^e	1.00 (da)	92	FhG-ISE (11/04)	Amonix back-contact [45]
CIGS (thin film)	21.8 ± 1.5 ^{d,f}	0.102 (da)	14	NREL (2/01) ^g	NREL
Multijunction cells					
GaInP/GaInAs/Ge (2-terminal)	41.6 ± 2.5	0.3174 (da)	364	NREL (8/09)	Spectrolab, lattice-matched [15]
Submodules					
GaInP/GaAs; GaInAsP/GaInAs	36.1 ± 2.2	0.313 (ap)	30	NREL (8/09)	U. Delaware, split spectrum [16]
GaInP/GaAs/Ge	27.0 ± 1.5 ^f	34 (ap)	10	NREL (5/00)	ENTECH [46]
Modules					
Si	20.5 ± 0.8 ^d	1875 (ap)	79	Sandia (4/89) ^g	Sandia/UNSW/ENTECH (12 cells) [47]
'Notable Exceptions'					
GaAs/GaSb (4-terminal)	32.6 ± 1.7 ^f	0.053 (da)	100	Sandia (10/89) ^g	Boeing, mechanical stack [48]
InP/GaInAs (3-terminal)	31.7 ± 1.6 ^d	0.063 (da)	50	NREL (8/90) ^g	NREL, monolithic [49]
GaInP/GaInAs (2-terminal)	30.2 ± 1.2 ^f	0.1330 (da)	300	NREL/FhG-ISE (6/01)	Fraunhofer, monolithic [50]
GaAs (high concentration)	26.6 ± 1.0	0.203 (da)	1000	Sandia (8/88) ^g	Varian [51]
Si (large area)	21.7 ± 0.7	20.0 (da)	11	Sandia (9/90) ^g	UNSW laser grooved [52]

^aEffic., efficiency

^b(da), designated illumination area; (ap), aperture area.

^cOne sun corresponds to direct irradiance of 1000 Wm⁻².

^dNot measured at an external laboratory.

^eMeasured under a low aerosol optical depth spectrum similar to ASTM G-173-03 direct [53].

^fMeasured under old ASTM E891-87 reference spectrum.

^gRecalibrated from original measurement.

지표에 도달하는 태양의 복사파는 그림 1에서 보듯 UV
에서부터 IR까지 spectrum이 매우 넓기 때문에 복사 에
너지를 되도록 광범위한 파장에서 흡수하여 전기에너지
로 바꾸는 solar cell이 가장 좋다고 할 수 있다. 현재 시
중에서 많이 구할 수 있는 solar cell은 silicon기반의
photovoltaic device인데, material의 종류를 바꾸지 않
고도 silicon의 phase에 따라 UV부터 NIR까지
absorption spectra를 조절할 수 있어서 공정비용을 줄
일 수 있기 때문이다. 요즘 많이 연구 되는 silicon 기반
의 solar cell은 세 겹 이상의 흡수층을 적층하여 태양 복
사파를 흡수하도록 하고 있다. [2,3]

Silicon을 기반으로 하는 photovoltaic cell의 경우 태
양의 복사파를 온전히 흡수하기 위해서는 대략 200 ~
250 μm 이상의 두께를 요구하는데, solar cell이 대면적
으로 만들어져야 한다는 점을 고려하면 흡수층의 두께를

줄이는 것은 제조비용을 줄이는 중요한 방법이다. 이를
위해서는 복사파가 silicon기반 흡수층에 머무를 수 있는
광 경로(optical path)가 길어지도록 하든지 흡수율 자체
를 증가시켜야 한다. Plasmonic photovoltaic device는

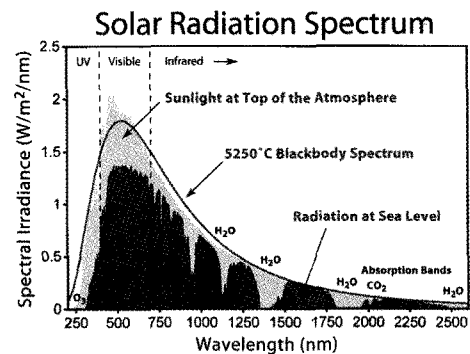


그림 1. 지표에 도달하는 태양 복사파 spectrum
(출처 : <http://org.ntnu.no/solarcells/pages/Chap.2.php>)

이러한 film 기반의 흡수층의 두께 및 구조를 좀 더 단순화 시키는 방법들을 제시해 준다. 다음 장부터 plasmon의 효과로 어떻게 solar cell의 효율을 향상시킬 수 있는지 알아보자.

2. 금속 나노 입자를 이용한 광 포획

금속과 유전체 계면의 surface plasmon은 앞서 논의된 바와 같이 사용되는 물질과 구조를 적절히 만듦으로써 태양의 복사 spectrum과 비슷한 공명 spectrum을 가지도록 할 수 있다. Plasmonic solar cell의 기본적인 아이디어는 surface plasmon을 발생시키는 물질과 구조를 이용하여 기존 solar cell 흡수층의 태양 복사파 흡수가 증가하도록 device를 설계하는 것이다. 이를 조금 더 깊이 들여다보기 위하여 현재까지 연구된 구조의 종류에 따라 구분해 보자면, 금속 나노 입자를 이용하는 방법과 (준)주기적인 구조를 가지는 film형태의 금속 박막을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. [4]

2.1. 금속 나노 입자의 “산란”을 이용하는 방법

표면이 평평한 흡수층에 전자기파가 입사하게 되면 Fresnel의 법칙에 따라 표면의 투과율과 반사율이 결정되고 반사되는 전자기파는 대개 homogeneous한 모양의 산란형태를 가지게 된다. 그러나 금속 나노 입자를 photovoltaic device의 흡수층의 표면에 뿌리게 되면 그림 2에서와 같이 입사하는 전자기파의 산란 방향을 굴절률이 큰 흡수층으로 향하도록 할 수 있다. [5-8] 전자기

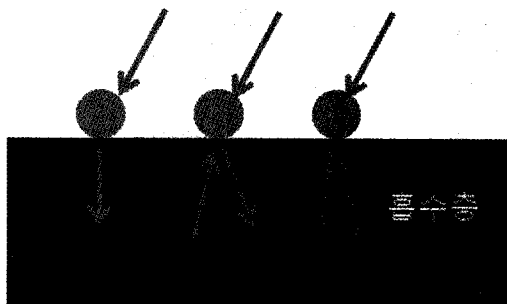


그림 2. 흡수층 위에 흩뿌려진 금속 나노입자에 의한 태양 복사파 산란. 공기중에서 입사되는 복사파에 대해서는 전방 산란을, 흡수층에서 나오는 전자기파에 대해서는 후방 산란을 주로 한다.

파가 파장보다 작은 원형에 가까운 금속 입자들에 의하여 산란되는 현상은 Mie 산란의 방법으로 근사되는데 이 근사에 의하면 입자의 주변 물질이 homogeneous할 경우엔 전방 산란과 후방 산란의 cross section이 비슷하게 된다. 그러나 한쪽이 공기 중으로 노출된 흡수층의 표면에는 전방산란의 효과가 커지게 되어 흡수층으로 전자기파의 field profile이 치우치도록 할 수 있다. 이와 더불어 흡수층으로부터 올라오는 전자기파에 대해서는 후방 산란이 증가되어 흡수층으로 다시 되돌려 보낼 수 있다. 따라서 태양의 복사파의 전체적인 반사가 줄어들게 되고 입사하는 전자기파가 흡수층에 오랜 시간 동안 (또는 긴 경로를 가지도록) 머물게 함으로써 전체적인 흡수를 증가시키게 된다. 이 방법은 많은 연구가 진행되어 입자의 형태나 크기 등에 따른 효과가 검증되었으며 photovoltaic cell 뿐만 아니라 최근 photodetector등 광 포획 안테나의 형태로 연구가 발전하고 있다. [9]

금속 나노 입자를 random하게 흩어 뿌리는 것과 주기적인 격자배열을 가지도록 뿌리는 것에는 흡수 spectra의 차이가 있다. Random하게 흩어 뿌리는 경우에 각각의 입자들의 산란 cross section이 서로 독립적이라고 할 수 있는데 이때에는 입자가 고유하게 가지고 있는 plasmon에 의한 spectra를 단순히 더하도록 전체 spectrum이 형성된다. 그러나 주기적인 격자를 가지도록 배열하면 입자들이 놓인 위치의 주기적인 성질에 의한 plasmonic band 구조가 형성되고 따라서 resonance나 suppression이 일어나는 spectra를 가지도록 설계할 수 있다. 이를 이용하면 흡수율이 낮은 IR 대역의 태양 복사 흡수를 증가시킬 수 있다. 태양 복사파의 broad한 spectrum에 대응하기 위해서 이 두 가지 배열 방법의 중간인 준주기적인 배열의 연구도 진행되고 있다. [4]

2.2. 금속 나노 입자의 plasmonic “field enhancement”를 이용하는 방법

금속 나노입자를 이용하는 또 한 가지 방법으로는 흡수층 내에 삽입을 하는 방법이 있다. 금속 나노 입자가 흡수층과 같은 주변 유전체에 둘러싸여 있을 때는 주로 dipole mode로 존재하는 localized surface plasmon이 여기 된다. 이 surface plasmon은 field intensity가 매

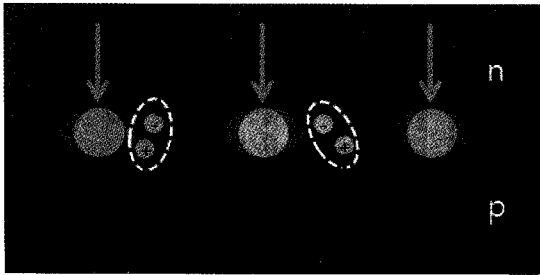
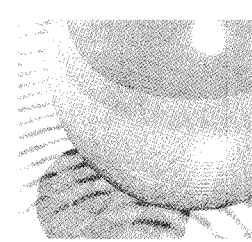


그림 3. 흡수층 속에 위치한 금속 나노입자 주변에 exciton이 형성되는 모습. 생성된 exciton의 전자와 정공은 각각 n형 또는 p형 층으로 분해되어 전류를 형성한다.

우 크기 때문에 interface 근처에서 단위 부피당 exciton을 발생시킬 확률이 증가하게 된다. [10] 이러한 방법으로 exciton을 증가시키게 될 때에는 그림 3과 같이 금속 나노입자를 주로 p-n junction과 같은 전자와 정공이 서로 다른 방향으로 쉽게 확산되는 근방에 위치시켜야 하는데, 그 이유는 생성된 exciton이 재결합하기 전에 전자와 정공이 분해되어야 하기 때문이다. 이렇게 Plasmon assisted exciton 생성과 이로 인한 전자 정공 분해에 관한 연구는 기존 nano-photonics와 nano-electronics의 경계에 해당하는 분야로서 앞으로 많은 연구가 필요하다.

3. “구조”화된 금속 film을 이용하는 광 포획

흡수층에 위치한 금속 나노 입자와 달리 (준)주기적으로 구조화된 금속 film을 이용하여 금속 / 유전체 계면의 surface plasmon polariton mode가 형성되도록 하는 방법이다. 두께를 줄인 흡수층의 경우 흡수되지 않은 광이 통과를 하는 경우가 있으므로 그림 4와 같이 주로 흡수층의 아래에 이러한 plasmonic 구조를 위치시키게 된다. 만일 금속 film에 구조가 없이 평평하다면 반사 거울처럼 작용하게 된다. 그러나 만일 금속과 흡수층 사이에 (준)주기적인 구조를 만들게 되면 거울과 달리 산란되는 방향을 interface와 평행하도록 조절하여 산란 후 광 경로를 증가시킬 수 있으므로 광흡수를 증가시킬 수 있게 된다. [11] 흡수층을 통과한 전자기파가 구조화된 금속 / 유전체 계면을 만나게 되면 이와 같이 일부는 photonic propagating mode로 산란 또는 반사되고 일부는 계면을 따라 흐르는 plasmonic evanescent wave

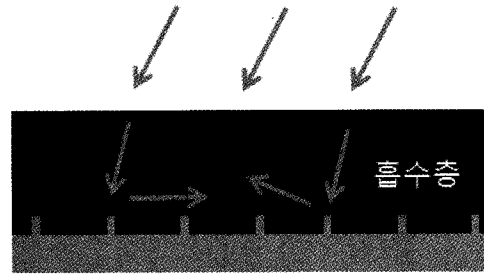


그림 4. 흡수층 아래에 구조화 된 금속 film의 역할. 흡수층에서 흡수되지 않고 통과하는 복사파를 다시 산란시켜 흡수층으로 되돌려 보낸다.

로 전파하게 된다. 이러한 evanescent mode의 전자기파 역시 흡수층에 머무는 시간이 증가하여 흡수될 확률이 높아지게 된다. [4]

4. 결론 및 미래의 plasmonic solar cell의 연구

지금까지 plasmonic solar cell의 원리와 물리적인 작용 mechanism에 대하여 살펴보았다. 두께가 얇으면서도 광학적 흡수가 뛰어난 solar cell을 금속 나노 입자의 산란 또는 localized surface plasmon field enhancement를 이용하여 구현할 수 있으며, 또한 plasmonic film 구조를 흡수층의 아래쪽에 위치시킴으로서 광 흡수를 증가시키는 방법도 알아보았다.

마지막으로 plasmonic solar cell의 연구는 아직 초보 단계이며 plasmon의 효과로 인해 부가적으로 발생하는 문제에 대한 연구는 아직 미비하다는 점을 지적하고자 한다. Plasmon의 효과로 복사파의 전체적인 흡수가 증가되어 많은 exciton이 형성되는 것은 매우 긍정적인 효과이나 흡수 이후에 형성된 exciton이 분해하여 전자와 정공으로 분리할 때의 위치가 plasmonic field의 영향 하에 있을 경우에 대해서는 재결합할 확률이 높아지게 된다. 따라서 exciton의 재결합율과 분해율을 잘 고려한 device 구조 설계에 대한 연구가 필요하다. 또한 plasmonic 효과를 주는 금속 물질 속으로 생성된 자유 전자가 다시 포획되는 확률을 줄이는 연구 또한 필요하다. 그리고 무엇보다도 plasmon의 효과를 이용하기 위해 사용하는 금속을 Ag, Au 등의 귀금속으로부터, 가격이 저렴한 Cu, Al 이나 새로운 plasmonic composite 물질로 대체하는 연구 또한 필수적으로 진행되어야 한다.

참고 문헌

- [1] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, and W. Warta, Progress In Photovoltaics : Research and Applications 18, 144-150 (2010).
- [2] K. L. Chopra, P. D. Paulson, and V. Dutta, Progress In Photovoltaics: Research and Applications 12, 69-92 (2004).
- [3] R. W. Miles, K. M. Hynes, and I. Forbes, Progress In Crystal Growth and Characterization Of Materials 51, 1-42 (2005).
- [4] H. A. Atwater and A. Polman, Nature Matererials 9, 205-213 (2010).
- [5] H. R. Stuart and D. G. Hall, Applied Physics Letters 69, 2327 (1996).
- [6] D. Derkacs, S. H. Lim, P. Matheu, W. Mar, and E. T. Yu, Applied Physics Letters 89, 093103 (2006).
- [7] K. R. Catchpole and A. Polman, Optics Express 16, 21793-800 (2008).
- [8] Y. A. Akimov and W. S. Koh, Plasmonics (online) DOI : 10.1007/s11468-010-9181-4 (2010).
- [9] L. Tang, S. E. Kocabas, S. Latif, A. K. Okyay, D.-S. Ly-Gagnon, K. C. Saraswat, and D. A. B. Miller, Nature Photonics 2, 226-229 (2008).
- [10] J. R. Nagel and M. A. Scarpulla, Optics Express 18 Suppl 2, A139-46 (2010).
- [11] W. Bai, Q. Gan, F. Bartoli, J. Zhang, L. Cai, Y. Huang, and G. Song, Optics Letters 34, 3725-3727 (2009).

약 력



이 장 원

2006년 8월 이후 삼성종합기술원 전문연구원
2006년 5월 Duke University, 이학 박사
1999년 2월 서울대학교 물리학과, 이학 석사
1997년 2월 서울대학교 물리학과, 이학사