

광자결정 수동소자

기 철 식*, 임 한 조*, 송 석 호**

*아주대학교 전자공학부, **한양대학교 물리학과

I. 서 론

21세기의 정보화사회에는 많은 양의 정보를 신속하게 전달하며 처리하는 기술이 요구될 것이라는 것은 누구나 예상하는바 이다. 하지만, 20세기의 과학발전을 주도했던 전자소자는 이러한 요구에 부응하기 어렵다는 것이 전문가들의 공통된 견해이며 그 대안을 광을 이용한 광소자에서 찾고 있다. 현대, 기존의 광소자들로서는 효율과 소자의 크기 면에서 한계를 보이고 있어 그 한계를 극복할 대안이 요구되어진다. 선진국들은 20세기 말에 때맞춰 등장한 광자결정이 그 대안이 될 것이라 기대하며 광자결정을 전략적인 차세대 연구 과제로 선정하여 집중투자하고 있으며 최근 미래를 선도할 나노기술의 한 부분으로 분류되어 나노광소자(nano-optical device) 혹은 나노광공학(nano-photonics)이라는 이름으로 미국을 비롯한 유럽과 일본 등에서 집중투자되고 있다.

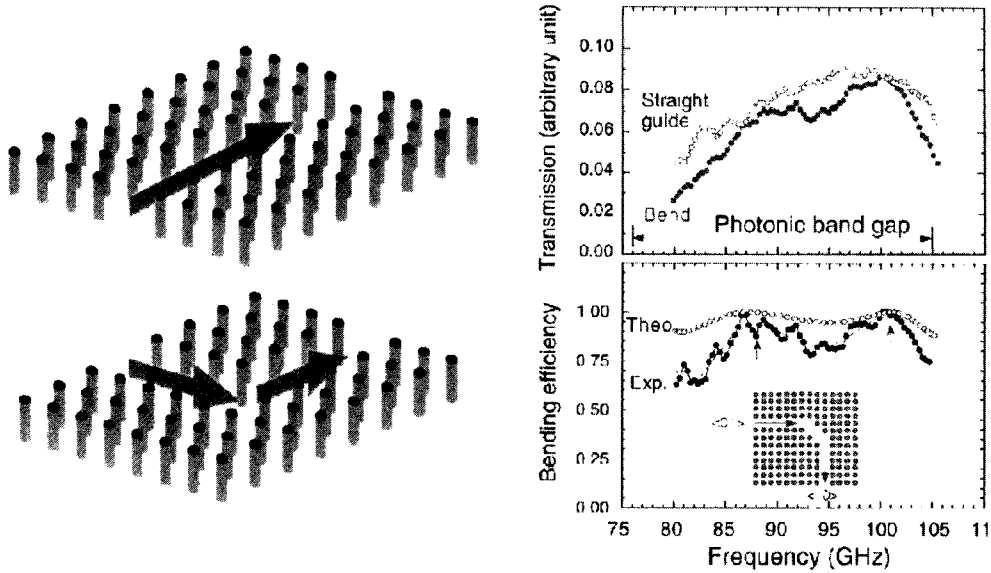
광자결정소자란 간단히 말해, 광자결정의 광자 띠간격, 광의 국소화, 비선형성, 그리고 강한 분산특성을 이용한 광소자이다.^[1] 광자결정소자의 종류는 크게 광원에 해당하는 레이저(laser)와 발광소자(light emitting device)와 같은 능동소자(active device)와 발생된 광을 원하는 방향으로 전파시키는 도파로(waveguide), 원하는 파장의 광만 선택적으로 통과시키는 필터(filter), 광의 진행방향을 여러 갈래로 분할하는 분할기(splitter), 그리고 여러 광을 혼합하는 혼합기(combiner)와 같은 수동소자(passive device)

로 나누어진다. 이러한 광자결정소자들은 그 구조상 유기적인 결합이 용이해 새로운 기능을 갖는 광소자개발과 광집적회로(photonic integrated circuit)의 실현을 가능케 하리라 예상하고 있다.

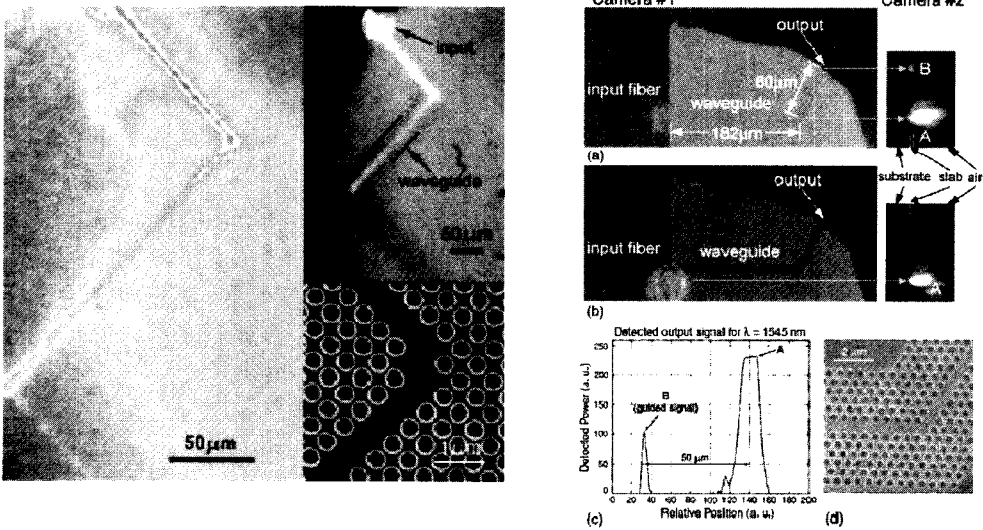
광자결정소자의 제작에는 최첨단의 반도체 e-beam lithography 기술과 전기 화학적 방법인 anodization 그리고 자가조립물질을 이용한 화학적 방법 등이 사용되고 있으며, 효과적인 제작방법의 개발과 정보교환을 위해 관련분야들 사이의 학제간 연구가 활발히 진행되고 있다. 광자결정소자의 연구에 있어 첨단기술을 요하는 제작기술 만큼이나 중요한 것은 제작에 앞서 원하는 기능을 갖는 광자결정소자의 구조를 설계하는 이론적 수치적 방법으로 제작경비와 비용을 줄이는 것뿐 아니라 광자결정소자의 기본적인 특성을 이해하는데 큰 도움이 되므로 세계 여러 연구 그룹에서 개발되고 있다.

II. 본 론

본 논고에서는 주로 광자결정 수동소자의 기본이 되는 광자결정 도파로의 특성과 그것을 이용한 고 기능성 수동소자들과 광자결정 광섬유, 광자결정의 독특한 성질인 초 프리즘과 음의 굴절률 등을 이용한 광소자, 또한, 박막 금속 광자결정에서의 표면 플라즈몬 띠 간격(surface plasmon band gap)을 이용한 도파로에 대해서 간단히 소개하고자 한다.



(a)



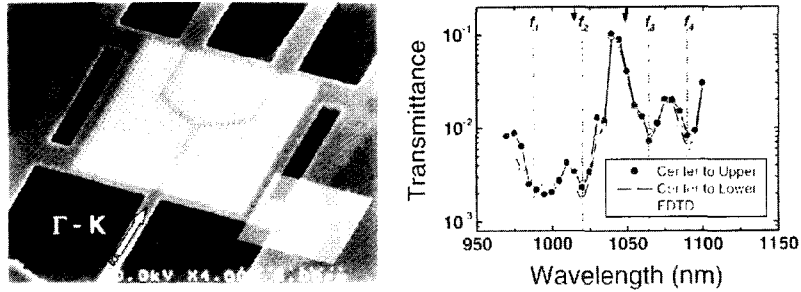
(b)

〈그림 1〉 (a) 급한 꺾임이 있는 광자결정 도파로의 마이크로파 도파특성,
(b) 급한 꺾임이 있는 광자결정 도파로의 광통신 파장의 도파특성

1. 광자결정 도파로

기존의 유전체나 광섬유를 이용한 광의 도파는 기본적으로 내부 전반사를 이용한 것이다. 이 때문에 도파되는 방향이 급하게 바뀌는 경우 도파되는 광의 에너지는 도파로를 따라 전달되지 못

하고 대부분 외부로 소실되어 버린다. 이러한 광섬유의 도파손실은 내부 전반사 현상에 기초한 도파원리에 기인하기 때문에 손실 문제해결을 위해서는 새로운 개념의 도파원리가 적용되는 도파관을 개발한 필요가 있다. 광자결정 도파로는 내



〈그림 2〉 막박형 광자결정 분배기와 측정결과

부 전반사가 아닌 다른 원리로 광을 도파시키는 데 바로 국소결함에 강하게 구속되는 결합모드를 이용하는 것이다. 국소결함을 한 방향으로 나열하면 결합모드의 광은 그 방향에 수직한 방향으로는 구속되어 있고 나열된 방향으로는 구속되지 않아 광이 국소결함이 나열된 방향으로는 도파되는 특성을 가진다. 이러한 특성은 굴곡이나 심한 꺾임이 있다고 하더라도 변하지 않으므로 광자결정 도파로를 이용하면 심지어 90°에 가깝게 꺾이는 코너에서도 광을 효과적으로 도파할 수 있을 것이라 예상되어졌고 최근 그 가능성이 실험적으로 보고되었다.^[2] 광자결정 도파로의 이러한 특성은 도파로로 이루어진 다양한 광소자의 성능을 향상시키며 크기를 줄이는데 유용할 것이다.

2. 광자결정 분배기

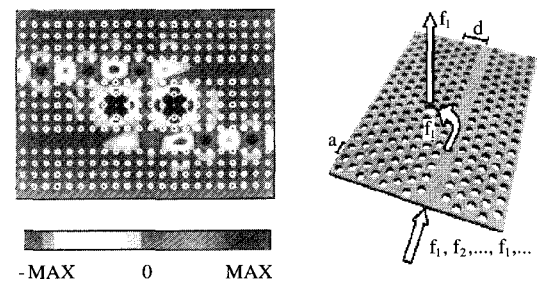
광 분배기는 광 신호를 나누는데 사용되는 소자로 광통신에 있어 필수적이다. 광 분배기에서 광 신호가 나누어 질려면 분배기를 구성하는 도파로에 곡률이 항상 있으므로 기존의 도파로로는 곡률에 의한 손실을 피할 수 없었다. 손실을 다소라도 줄이기 위해서는 곡률을 완만히 변화시켜야 하는데, 이것은 광 분배기의 전체적인 크기를 증가시키는 단점이 되고 있다. 이러한 기존의 광 분배기의 한계는 심한 꺾임에도 손실 없이 광을 도파하는 광자결정 도파로를 이용해 해결될 수 있을 것이다.

〈그림 2〉는 광집적회로의 구성에 적합한 막박형 Y형 광자결정 분배기로 각 방향으로 분배되어진 광의 도파특성이 거의 일치하는 것을 볼 수

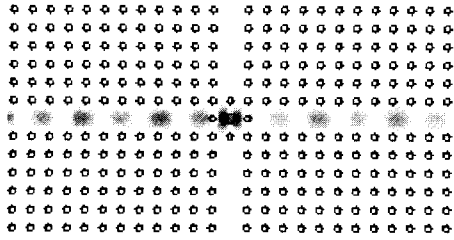
있다.^[3] 측정된 도파효율이 낮은 이유는 수직방향의 유한성으로 인해 수직방향의 방사와 입력과 출력 단에서의 임피던스 불일치로 인한 반사 때문이다. 특히, 입력과 출력 단에서의 임피던스 불일치로 인한 도파효율의 저하는 광자결정 분배기 뿐 아니라 광자결정 도파로로 이루어지는 다양한 광자결정 소자에서 일어나는 문제이다. 일반적으로 임피던스는 구조에 따라 달라지므로 입력과 출력단의 구조에 따른 광자결정 도파로의 도파특성은 광자결정 도파로의 실제 응용에 매우 결정적인 요인이다. 그러므로, 최근 이에 대한 연구가 집중적으로 진행되고 있다.^[4]

3. 광자결정 필터

광소자에 다양한 기능을 구현하기 위해서는 도파로와 더불어 광필터가 필수적이다. 특히, 광집적회로의 실현에 용이한 막박형태의 광자결정 상에서 광필터의 설계는 현재 전 세계적으로 연구가 진행중이다. 〈그림 3〉은 광자결정 공진기와 도파로를 이용한 필터로써 여러 파장의 광들 중



〈그림 3〉 광자결정 add-drop 필터와 vertical drop 필터



〈그림 4〉 광자결정의 반향성 필터

에서 특정파장의 광만 공진기와 도파로간의 상호작용을 이용해 다른 도파로로 dropping하거나 수직방향으로 필터링할 수 있음을 보여준다.^[6] 이러한 구조는 add-drop filter나 파장 다중 분할기의 기능을 할 수 있어 많은 연구의 대상이 되고 있다.

또한, 공진기와 도파로 간의 상호작용에서 각 모드의 대칭성을 이용하여 도파로의 접합으로 생기는 cross-talk 현상을 획기적으로 개선할 수 있음도 제안되었다.^[6]

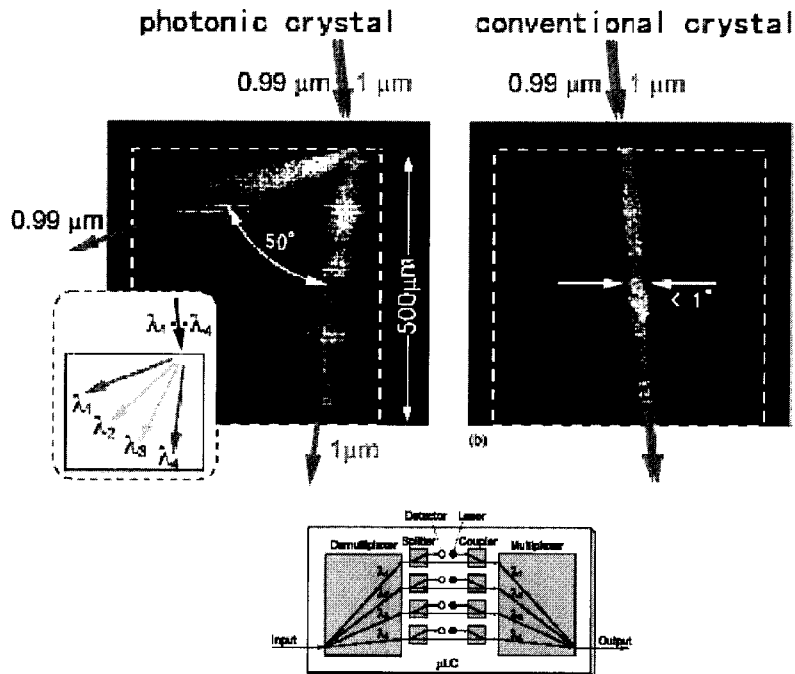
4. 광자결정의 초 프리즘현상

기존의 유리 프리즘에 비해 수백배에 이르는

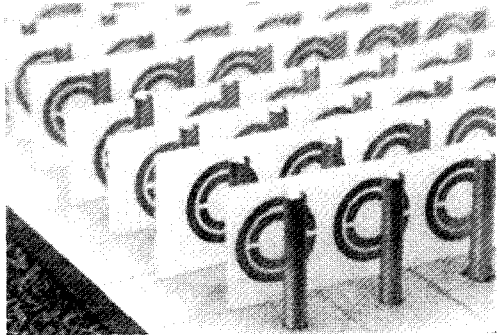
분산을 갖는 광자결정의 강한 분산을 이용한 초 프리즘 현상은 일본의 NEC 그룹에서 보고 되었다.^[7] 아래의 사진은 광자결정의 초 프리즘 현상을 보여주는 것으로 광들의 파장 차이가 $0.01 \mu\text{m}$ 인 경우 광자결정 프리즘은 50° 나 되는 굴절각의 차이를 주는 것을 보여준다. 따라서, WDM에 핵심적인 소자인 도파로 격자 배열(arrayed waveguide grating, AWG)의 기능을 아주 작은 크기의 광자결정이 할 수 있으므로 초 프리즘 현상을 이용하면 광통신 소자의 크기를 소형화하고 광회로의 집적도를 획기적으로 개선할 수 있을 것이다.

5. 광자결정의 음의 굴절률

1960년대에 Veselago는 자화율과 유전율이 모두 음수인 물질의 전자기파특성에 대한 연구결과를 보고하였다. 자화율과 유전율이 모두 음수인 물질을 소위 왼손물질이라 부른다. 이는 왼손 물질의 굴절률이 음수이기 때문에 왼손물질 내에서의 전자기파의 전파방향이 굴절률이 양수인 보



〈그림 5〉 광자결정의 초 프리즘 특성과 이를 이용한 WDM의 개략도

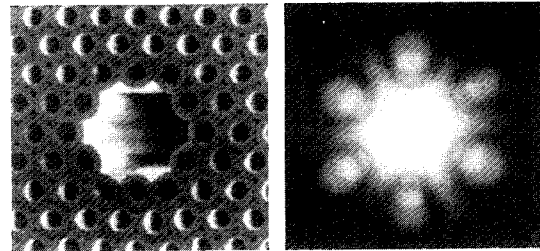


〈그림 6〉 마이크로파 영역에서의 원손물질

통의 물질 안에서의 전파방향과 반대이기 때문에 전기장, 자기장, 그리고 전파방향이 오른손법칙이 아니라 왼손법칙을 따르기 때문이다. 최근 광자 결정의 유효한 굴절율이 특별한 주파수 대역에서 음의 값이 될 수 있음이 실험적으로 밝혀져 음의 굴절율을 이용한 초소형 광분배기, 완벽한 렌즈, 고효율 광 tunneling 소자 등 새로운 광소자 개발에 많은 연구가 진행되고 있다. 〈그림 6〉은 마이크로파 영역에서 음의 굴절율을 보이는 주기적인 구조이다.^[8]

6. 광자결정 광섬유

기존의 광섬유는 내부 전반사를 이용해 광을 도파하기 때문에 항상 손실이 있어 보통 60~80 km 마다 광 증폭기가 필요하다. 하지만 광자 결정 광섬유는 전반사의 원인이 되는 core와 cladding의 굴절률 차이가 아닌 광자띠간격을 이용하여 광을 도파하므로 그 특성이 매우 다르다. 〈그림 7〉은 광자결정을 이용해 새로운 형태의 광섬유로 2차원 광자결정으로 되어 있는 주변부분이 광자띠간격으로 인해 cladding 역할을 하고 중앙부분이 core 역할을 해 기존의 광섬유에서 발생하는 도파손실을 획기적으로 줄일 수 있다.^[9] 또한, 적절한 설계를 통해 색분산의 조절이 가능하며 도파모드의 도파 단면적을 매우 크게 또는 작게 할 수 있어 의학용 레이저나 고 강도 레이저에 유용할 것이며 비선형 효과가 매우 작아 장거리 광통신에 매우 유용할 것으로 기대되고 있다.

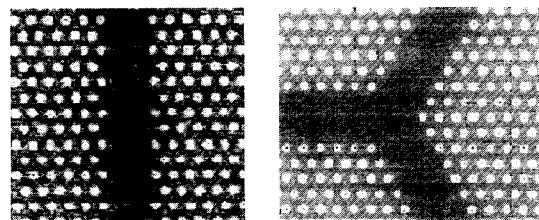


〈그림 7〉 광자결정 광섬유와 도파모드

7. 금속 광자결정 도파로

표면 플라즈몬이란 금속과 유전체의 경계면을 따라서 진행되는 표면파를 말한다. 앞에서 소개한 유전체로 이루어진 광자결정 도파로와 같은 원리로, 금속표면에 형성된 주기적인 구조로 인해 표면 플라즈몬이 도파되지 못하는 주파수 영역, 즉, 표면 플라즈몬 띠 간격을 이용하여 다양한 도파로 구현과 도파 효율 향상이 가능하다. 〈그림 8〉은 금속 박막에 주기적인 구멍을 만들어 실제 제작된 다양한 금속광자결정 도파로 들이다.^[10]

금속 표면자체가 주기적인 구조로 굴곡이 만들어져 있거나, 혹은 금속표면 위에 주기적인 유전체 구조가 있을 때에도 표면 플라즈몬 띠가 형성된다. 비록 격자의 굴곡 깊이가 수십 nm밖에 되지 않고 격자를 이루고 있는 물질간의 굴절률의 비가 크지 않아도 넓은 밴드 갭이 형성됨 확인할 수 있다.^[11] 이것은 표면 플라즈몬이 표면에만 구속화 되어 있을 뿐만 아니라 표면에 강한 전기장 분포를 가지기 때문에 가능하다. 표면 플라즈몬 밴드갭은 다른 광자 밴드갭과는 다르게 격자주기에 따라 비례하여 변할 수 없는 양이다. 이러한 표면플라즈몬 밴드갭의 특성은 유전체 격자를 이



〈그림 8〉 Ag 박막으로 제작된 금속광자결정 도파로들

용해서 분산관계를 조절할 수 있고, 또한 표면에 강한 전기장이 생기기 때문에, 고감도 센서 및 비선형 광학 효과 등을 연구하는데 매우 적합하다고 볼 수 있다.

이 외에도 박막형 금속광자결정을 이용한 supercollimator, 광 증폭기 등이 제안되고 있으며 주기가 수십 나노미터 정도인 금속광자결정의 특이한 광학적 특성은 수 나노미터 정도의 크기를 갖는 금속 자가조립체의 비선형 광특성과 더불어 나노광학의 주요연구주제로 큰 관심의 대상이 되고 있다.

III. 맺음말

이상에서 광자결정 수동소자의 특성과 그것을 이용한 예들을 간략하게나마 살펴보았다. 서론에서 언급했듯이 21세기 정보화 사회에서 초고속 통신망과 고용량의 정보를 신속히 처리하는 소자에는 전자회로가 아닌 광집적회로가 핵심적인 역할을 할 것이다. 이 때문에 세계 여러 나라의 대학 및 연구소는 광자결정 광집적회로 구현에 필요한 새로운 기능을 갖는 광자결정 소자의 개발과 미래원천기술 확보에 힘쓰고 있다. 아직까지는 광자결정 능동소자와 수동소자들의 개별적인 특성을 연구하고 있지만 머지않아 이것들로 이루어진 초보적인 광집적회로 개발이 이루어질 것이다.

참 고 문 헌

- [1] E. Yablonovitch, "Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics", *Phys. Rev. Lett.* vol. 58, no. 20, p.2059, 1987. For more informations, <http://www.pbglink.com>.
- [2] S. Lin, E. Chow, V. Hietala, P. R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, "Experimental Demonstration of Guiding and Bending of Electromagnetic Waves in a Photonic Crystal", *Science* vol. 282, p.274, 1998.
- [3] Y. Sugimoto, N. Ikeda, N. Carsson, K. Asakawa, N. Kawai, and K. Inoue, "Light-propagation characteristics of Y-branch defect waveguides in AlGaAs-based air-bridge-type two-dimensional photonic crystal slabs", *Opt. Lett.* vol. 27, no. 6, p.388, 2002.
- [4] A. Adibi, Y. Xu, R. K. Lee, A. Yariv, and A. Scherer, "Guiding mechanism in dielectric-core photonic-crystal optical waveguides", *Phys. Rev. B* vol. 64, no. 3, p.033308, 2001.
- [5] S. Noda, A. Chutinan, and M. Imada, "Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure" *Nature* vol 407, p.608, 2000.
- [6] S. G. Johnson, C. Manolatou, S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos, and H. A. Haus, "Elimination of cross talk in waveguide intersections," *Opt. Lett.* vol. 23, p. 1855, 1998.
- [7] H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. Tamamura, T. Sato, and T. Kawakami, "Superprism phenomena in photonic crystals", *Phys. Rev. B* vol. 58, no. 16, p.R10096, 1998.
- [8] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity", *Phys. Rev. Lett.* vol. 84, no. 18, p.4184, 2000.
- [9] J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks, and P. St. J. Russell, "Photonic Band Gap Guidance in Optical Fibers", *Science* vol. 282, p.1476, 1998.

- [10] S. I. Bozhevolnyi, J. Erland, K. Leosson, P. M. Skovgaard, and J. M. Hvam, "Waveguiding in Surface Plasmon Polariton Band Gap Structures", Phys. Rev. Lett. vol. 86, no. 14, p.3008, 2001.
- [11] Jaewoong Yoon, Gwansu Lee, Seok Ho Song, Cha-Hwan Oh, and Pill-Soo Kim, "Surface-plasmon photonic bandgaps in dielectric gratings on a flat metal surface", J. Applied Physics, to be published, 2003.

저자 소개



奇 喆 植

1992년 2월 부산대학교 물리교육학과(학사), 1996년 2월 한국과학기술원 물리학과(석사), 2000년 2월 한국과학기술원 물리학과(박사), 1999년 10월~2000년 10월 : UCLA, Post Doc.(E. Yablonovitch's group), 2000년 11월~현재 : 아주대 분자과학기술학과 연구 조교수, <주관심 분야 : 광자결정 광소자 및 마이크로파 소자.>



林 漢 祚

1971년 서울대학교 문리대(물리학 학사), 1974년 서울대학교 물리학과(고체물리학 석사), 1982년 불란서 Montpellier 2대 물리학과(고체물리학 박사), 1982년 2~8월 : Montpellier, Post Doc, 1986년 2월~1987년 1월 : 불란서 Ecole Normale 고체물리 그룹 연구원, 1995년 4월~1997년 3월 : 물리학회 응용물리지 편집간사, 1993년 3월~1995년 2월 : 아주대학교 연구처장, 1997년 2~8월 : Northwestern대 전기 및 컴퓨터공학과 visiting scholar, 1975년 9월~현재 : 아주대학교 전자공학부 교수, <주관심 분야 : 반도체 결함 관련 전기적·광학적 특성, 반도체 계면 및 금속/반도체 계면의 전자적 특성, 양자구조의 전자적 특성, III-V족 반도체 소자, 화학 센서, 전자소자의 잡음현상, 광자결정>



宋 錫 虎

1984년 연세대학교 물리학과(물리학 학사), 1986년 한국과학기술원 물리학과(응용광학 석사), 1989년 한국과학기술원 물리학과(응용광학 박사), 1989년 3월~1997년 8월 : 한국전자통신연구원 선임연구원, 1997년 9월~현재 : 한양대학교 자연과학대학 물리학과 교수, <주관심 분야 : 마이크로 광학, 회절격자, 표면플라즈몬 광자결정, 광연결>