

초소형 자유전자 레이저 모듈에 대한 특성 연구

김영철¹, 안성준², 김호섭¹, 김대욱¹, 안승준^{1*}

Study on the characteristics of miniaturized free electron laser module

Young-Chul Kim¹, Seong-Joon Ahn², Ho-Seob Kim¹, Dae-Wook Kim¹
and Seungjoon Ahn^{1*}

요 약 마이크로 칼럼 기술을 응용한 초소형 자유전자 레이저 모듈의 특성을 연구하였다. 초소형 자유전자 레이저는 전자 방출원과 방사광 발생 장치로 나뉜다. 방사광 발생 장치는 위글러(wiggler)라 불리는데 그리드(grid) 판으로 구성되어 있다. 전자가 위글러를 지나갈 때 규칙적으로 배열된 그리드에 인가된 전압에 의하여 전자의 궤적이 사인(sinusoidal) 함수 모양으로 주기적으로 변하여 방사광을 발생시킨다. 본 연구에서는 초소형 자유전자 레이저 위글러의 매개 변수에 따른 전자빔 궤적을 전산모사를 이용하여 분석하였다. 쌍을 이루는 위글러 간격, 그리드의 폭, 깊이, 주기, 그리고 그리드에 인가된 전압이 전자빔에 미치는 효과를 조사하였다.

Abstract We investigated the miniaturized free electron laser(FEL) module based on microcolumn. The miniaturized FEL is composed of two parts: electron generation part and radiation emission part. The radiation emission part, called wiggler, consists of a grid plate. While the electrons are passing through the wiggler, electron trajectory shows sinusoidal curve caused by the periodically applied voltage on the grid, and then it give rise to radiation emission. We analyzed the wiggler parameters, grid width, depth, period, applied voltage and the pair wiggler space using 2-D simulation tool.

Key Words : Microcolumn, 자유전자 레이저 모듈, THz, 그리드 매개변수, 위글러 간격

1. 서론

Maxwell에 의해 빛이 전자기파의 일종으로 규명된 이래로 전자기파는 인류의 생활과 매우 밀접하게 관계를 가지며 활용되어 왔다. 10^9 Hz 정도의 비교적 낮은 주파수를 가지는 라디오파에서부터 마이크로파, 적외선, 가시광선, 자외선, 그리고 X-ray와 γ -ray에 이르기까지 각각의 주파수 영역에 알맞은 해야될 수 없을 만큼 다양한 응용들을 우리 생활에서도 쉽게 접할 수 있다.

예를 들어, 라디오파나 마이크로파는 오늘날 통신의 가장 핵심으로 떠오르는 무선이동통신에 활용되고 있으며, 적외선은 광통신과 각종 센서 등에 널리 쓰이고 있다. 가시광선 역시 각종 간섭계, 센서, 계측기, 의료기 등에 활용되고, 자외선은 살균·소독 및 에폭시(epoxy)의 경화

작용 등에 널리 사용된다. X-ray는 일반인들도 누구나 한 번쯤은 방사선 촬영을 통해 경험을 해 보았을 것이다.

이렇게 전자기파는 모든 주파수 영역이 우리의 생활과 밀접하게 관련되어 사용되고 있으며, 각각의 영역에 대해서 그러한 파동을 만드는 파원 혹은 광원과 이를 감지하는 검출기 또한 잘 발달되어 있다. 그런데, 이러한 전자기파의 영역 중에서 유일하게 미개척 영역으로 남아있는 부분이 바로 THz 영역이다. THz 영역은 마이크로파와 적외선의 중간에 위치한 영역으로 주파수로는 0.3~10 THz, 파장으로는 30~1000 μ m 사이의 전자기파 대역을 의미한다[1-6]. 이 부분이 현재까지 미개척 영역으로 남아있었던 가장 큰 원인으로서는 효율적인 광원을 만들기 어려웠다는 점을 꼽을 수 있다[1]. 다른 영역들은 안테나를 비롯하여 레이저와 같이 효율적인 광원의 개발이 이

¹선문대학교 신소재학과/차세대반도체기술연구소

²선문대학교 정보통신공학부/차세대반도체기술연구소

*교신저자: 안승준(sjan@sunmoon.ac.kr)

접수일 08년 07월 08일

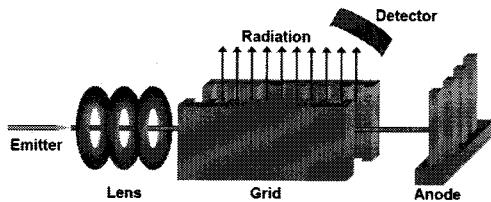
수정일 (1차 08년 09월 18일, 2차 08년 12월 05일)

게재확정일 08년 12월 16일

루어졌으나, THz 영역은 광원을 만들기 어렵지 않았고, 그런 이유로 0.3~10 THz 주파수 대역을 THz 갭(gap)이라고 부른다. 본 연구에서는 원적외선(FIR) 영역을 포함한 다양한 파장의 빛을 낼 수 있는 초소형 복사(radiation) 발생 모듈을 전산모사를 통하여 연구하였다.

2. 초소형 자유전자 레이저 모듈

초소형 모듈은 그림 1과 같이 초소형 전자 발생기와 복사 발생장치로 구성된다. 초소형 전자 발생기는 전체 길이가 수 cm이고, 전자를 방출하는 방출원, 세 개의 원형 전극으로 이루어진 전자 렌즈로 구성된다. 복사 발생장치는 전자 경로를 주기적으로 바꾸어 전자기파를 방출하는 위글러, 그리고 위글러를 통과한 전자를 흡수하기 위한 애노드(anode)로 구성된다[5, 6].



[그림 1] 초소형 자유전자 레이저 모듈의 구조

전자를 방출하는 방출원은 텅스텐 와이어(wire)를 에칭하여 뾰족하게 제작 한다. 이는 끝이 뾰족할수록 방출원 끝에서의 전기장의 세기가 강해져 낮은 전압에서도 쉽게 전자를 방출할 수 있기 때문이다. 전자 렌즈는 세 개의 원형 전극으로 구성되어 있으며 방출원에 가까운 전극을 추출자(extractor)라 부르는데 이는 접지 또는 양(+)의 전압을 가하여 전자 방출원으로부터 전자를 방출하는데 이용된다.

두 번째 전극은 접지 또는 음(-)의 전압을 인가하여 광출 방향으로 전자 빔을 모아 주고 평행 빔을 만드는데 활용된다. 세 번째 전극은 접지되는데 보통 축으로부터 큰 각도로 벗어난 전자를 걸러주는 역할을 하는데 이를 조리개(limiting aperture)라 부른다[7, 8].

전자 렌즈를 통과한 전자빔은 그리드로 구성된 위글러를 지나게 되는데, 각 그리드에 전압을 주기적으로 바꿔주면 이곳을 지나는 전자의 궤적이 주기적으로 변하면서 전자기파를 방출하게 된다. 방출된 전자기파는 그리드 간격과 전자빔의 속도 v 에 의해 파장 λ 가 결정 된다[5].

$$\lambda = D(\beta^{-1} - \cos\theta)$$

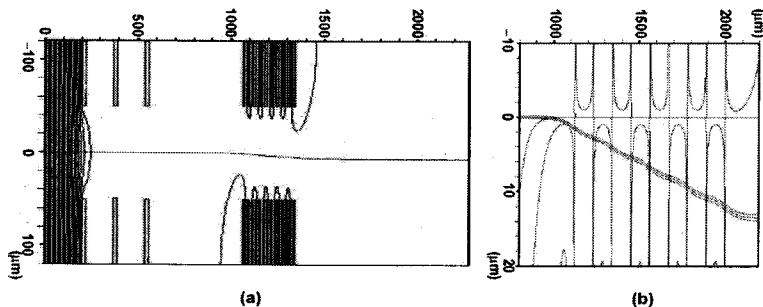
여기서 D 는 그리드 주기, $\beta = v/c$, 그리고 θ 는 측정 각이다. 본 연구에서는 300~900 μm 정도의 광을 얻기 위하여 200~2000 eV 이하의 저에너지를 사용할 것이다. 표 1은 전자 에너지에 따른 그리드 간격을 나타낸 것이다.

[표 1] 전자에너지에 따른 그리드 간격 ($\lambda = 300 \mu\text{m}$, $\theta = 15^\circ$).

| 전자 에너지 (eV) | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 |
|--------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 그리드 간격 (μm) | 8.6 | 12.3 | 15.2 | 17.7 | 20.0 | 22.0 | 23.9 | 25.7 | 27.4 | 29.0 |

3. 전산모사

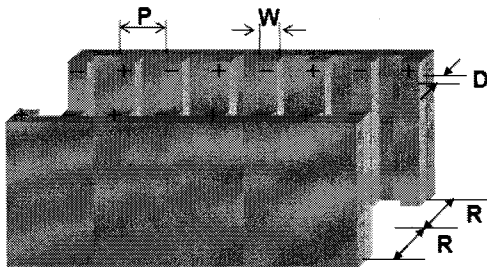
본 연구에서는 자체 개발한 2차원 전산모사 툴(2-D simulation tool)를 활용하여 Maxwell 미분방정식으로부터 모듈의 최적 조건을 제시하고자 한다.



[그림 2] 모듈 구조에 대한 등전위선과 전자 궤적. (a) 전체, (b) 위글러 부근 모습

그림 2는 2차원 전산모사 툴을 이용하여 단순화된 모듈 구조에 대한 등전위선과 전자 궤적을 계산한 것이다. 전자빔의 궤적은 그리드의 여러 가지 기하학적 인자에 의존하며 이로 인하여 복사광의 특성이 결정된다.

그림 3은 한 쌍의 위글러와 위글러를 구성하는 그리드 구조이다. 그리드의 매개변수에는 그리드 주기(P), 그리드 넓이(W), 그리드 깊이(D), 그리고 마주보는 한 쌍의 위글러 간격(R) 등이 있다. 본 연구에서는 전산모사를 이용하여 초소형 자유전자 레이저 위글러의 매개 변수에 따른 전자빔 궤적을 분석하였다.



[그림 3] 한 쌍의 위글러 구조

3.1 위글러 간격 효과

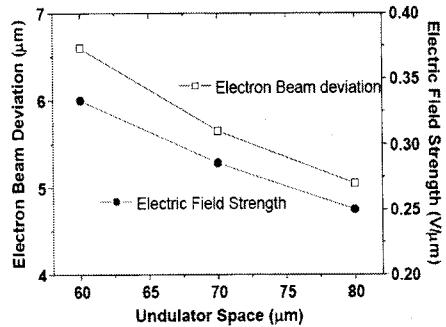
위글러는 등간격으로 배열된 그리드로 구성되어 있어 위글러 내부에서 주기적으로 변하는 전위를 형성하여 근처를 지나는 전자를 주기적으로 흔들어 주기 때문에 전자빔 궤적이 주기적으로 변하므로 이에 해당하는 빛을 방출한다. 또한 전자빔은 주기적으로 흔들릴 뿐만 아니라 전자빔이 전체적으로 한쪽으로 편향된다.

한 쌍의 위글러에는 서로 마주보는 그리드에 전압을 서로 어긋나게 인가된다. 이는 한쪽 그리드에는 (+) 전압을 인가하여 전자를 끌어당기고 맞은편 그리드에는 (-) 전압을 인가하여 전자를 밀어 줌으로써 전자빔을 효과적으로 흔들어 줄 수 있기 때문이다.

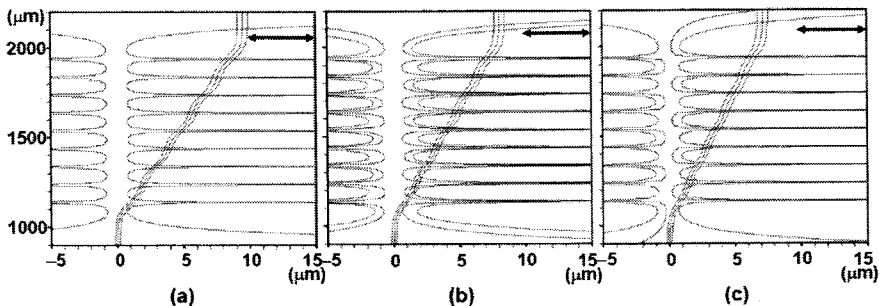
이로 인하여 전자빔이 전체적으로 한쪽으로 편향된다. 편향되는 정도는 위글러의 각 그리드에 인가된 전압과 위글러 간격에 영향을 받는다.

그림 4는 위글러 간격에 따른 전자빔의 궤적을 나타낸 것이다. 여기서 그리드 폭은 50 μm , 그리드 주기는 100 μm , 그리고 각 그리드에 인가된 전압은 ± 20 V이다. 위글러 간격이 좁으면 위글러 사이에 상대적으로 높은 전기장이 형성되어 전자의 궤적에 큰 변화를 주고, 반대로 위글러 간격이 넓으면 낮은 전기장이 형성되어 전자의 궤적 변화가 작다. 전자빔을 효과적으로 흔들어 주기 위해서는 위글러 간격이 좁아야 하지만 너무 좁으면 전자빔이 에노드까지 가지 못하고 위글러에 충돌하여 손실될 수 있기 때문에 위글러의 각 그리드에 적절한 전압을 인가해야 한다.

그림 5는 위글러 간격에 따른 위글러 중심에서 전기장의 세기와 전자빔의 편향 거리를 나타낸 것이다. 위글러의 각 그리드에 인가된 전압은 ± 20 V로 고정되어 있고, 위글러의 간격을 변화시킴으로써 위글러 내부에서의 전기장의 세기가 변한다. 이에 따라 전자빔의 편향 거리도 변하는데, 전기장의 세기는 위글러의 간격에 반비례하고 편향거리 역시 위글러의 간격에 반비례한다.



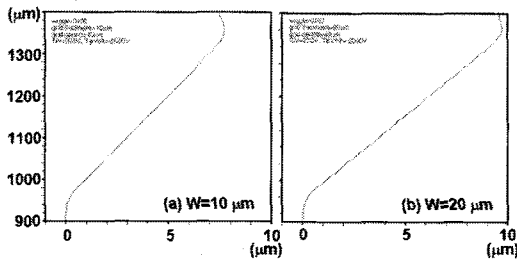
[그림 5] 위글러 중심에서 전기장의 세기와 전자빔의 편향 거리.



[그림 4] 그리드 간격에 따른 위글러 내부에서의 등전위선과 전자빔 궤적. (a) $R = 60 \mu\text{m}$, (b) $R = 70 \mu\text{m}$ (c) $R = 80 \mu\text{m}$.

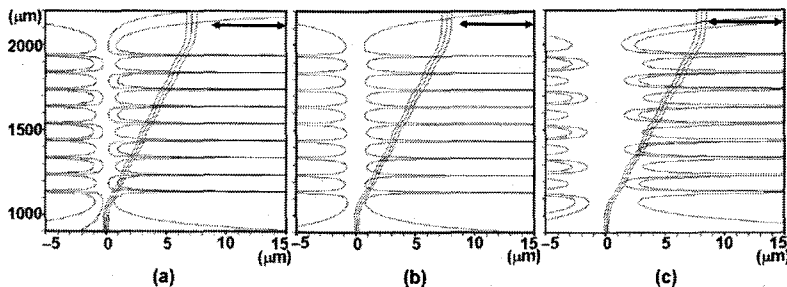
3.2 그리드 넓이, 깊이 효과

그리드 넓이 W 는 근처를 지나는 전자빔의 궤적에 큰 영향을 준다. 이는 그리드의 폭이 넓으면 그리드에 인가된 전압에 의하여 영향을 받는 구간이 넓어지기 때문이다. 그림 6은 전자 방출원에 -2000 V 의 전압이 인가되어 방출된 전자가 그리드의 영향으로 변화된 전자빔의 궤적을 보여준다. 이때 그리드에 인가된 전압은 200 V 이고 그리드 주기는 $40\ \mu\text{m}$ 이다. 그림 6 (a)와 (b)는 각각 그리드 폭이 $10\ \mu\text{m}$ 와 $20\ \mu\text{m}$ 인 경우의 결과이다. 폭이 $20\ \mu\text{m}$ 일 때 궤적의 변화는 폭이 $10\ \mu\text{m}$ 일 때 보다 대략 25% 정도 더 큰 것을 알 수 있었다. 전자 궤적을 변화시켜 복사광을 효과적으로 얻기 위하여 폭이 어느 정도 크게 하는 것이 바람직함을 알 수 있다. 다만 원하는 파장의 빛을 얻기 위하여 그리드 주기를 고정시켜야 하기 때문에 폭을 넓히는 데는 한계가 있다. 이를 감안하여 적당한 폭을 갈도록 제작하는 것이 바람직하다.



[그림 6] 그리드 폭에 따른 전자빔 궤적 (그리드 인가전압 : 200V , 그리드 주기 : $40\ \mu\text{m}$).

그림 7은 위글러의 그리드 깊이에 따른 전자빔 궤적 변화를 나타낸 것이다. 여기서 그리드 폭은 $50\ \mu\text{m}$, 그리드 주기는 $100\ \mu\text{m}$, 그리고 각 그리드에 인가된 전압은 \pm



[그림 7] 그리드 깊이에 따른 위글러 내부에서의 등전위선과 전자빔 궤적. (a) $D=30\ \mu\text{m}$, (b) $D=40\ \mu\text{m}$, (c) $D=50\ \mu\text{m}$.

20 V 이다. 그리드 깊이에 따라 전자빔 궤적의 편향 거리는 약간 차이가 있지만 큰 차이는 없다. 또한 전자빔의 주기적으로 흔들리는 진폭에도 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

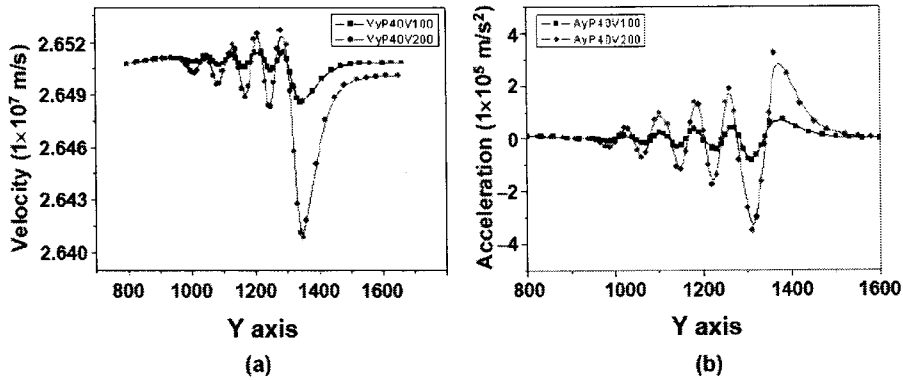
3.3 그리드 인가 전압 효과

전자를 효과적으로 흔들어 주기 위해서 그리드에 적절한 전압을 인가하여야 한다. 그림 8은 그리드에 인가된 전압에 의한 전자빔의 속도와 가속도를 나타낸 것이다. 전자빔은 진행 방향인 z -축에 대하여 수평방향, 즉 y -축으로 주기적으로 흔들린다. 그림 8의 (a)와 (b)에서 보여주는 바와 같이 수평방향으로의 전자빔 속도 및 가속도 변화가 z -축에 따라 점점 커지는 이유는 전자빔이 z -축으로 진행함에 따라 위글러의 한쪽으로 편향되기 때문이다. 즉, 한쪽으로 편향된 전자는 그리드에 점점 가까워져서 그리드에 인가된 전압의 영향을 크게 받는다.

또한 그리드에 인가된 전압이 높을수록 전자빔의 속도 변화는 더욱 커짐을 알 수 있다. 이는 그리드에 인가된 전압이 높을수록 전자빔을 효과적으로 변화시켜 방사광 방출이 용이할 것으로 추정된다. 즉, 위글러에 입사되는 전자 수가 많을수록 높은 전압을 인가하여야 많은 전자들에게 모두 영향을 가할 수 있다. 다만 표 1에서 보는 바와 같이, 그리드의 간격이 원하는 파장에 따라 다르지만 원적외선을 얻기 위한 그리드 간격이 수 μm 에서 수십 μm 로 그 간격이 매우 좁기 때문에 그리드에 높은 전압을 인가하는 경우 단락이 일어날 가능성이 있어 전압을 적절하게 조절하는 것이 필요하다.

3.4 그리드 주기 효과

자유전자 레이저의 큰 장점 중 하나는 파장을 자유롭게 조절할 수 있다는 것이다.



[그림 8] 그리드에 인가된 전압에 따른 전자빔의 (a) 속도 (b) 가속도.

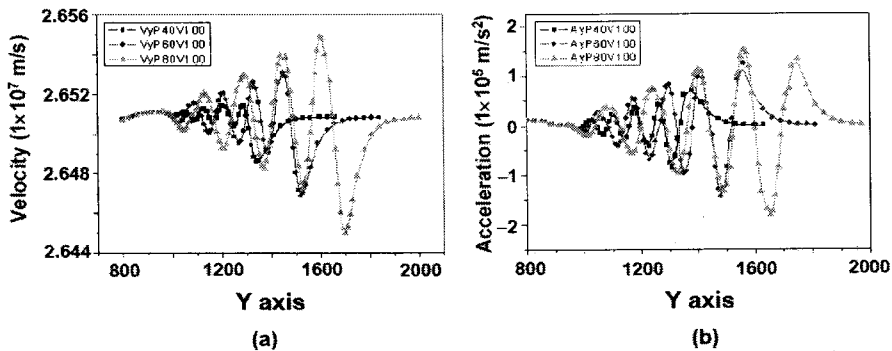
방사광의 파장은 전자빔의 에너지와 위글러를 구성하는 그리드의 간격이다. 앞에서는 그리드의 폭, 위글러 간격, 그리드에 인가되는 전압에 따른 전자빔의 궤적, 속도, 가속도의 변화를 조사하였다. 앞에서의 매개변수 효과가 방사광의 파장에 있어 가장 중요한 그리드 주기를 변화시켰을 때에도 역시 효과적으로 작동할 수 있을 지에 대한 조사가 필요하다.

그림 9는 그리드에 인가되는 전압을 100 V로 고정하고 그리드의 주기를 변화시켰을 때 전자빔의 속도와 가속도를 나타낸 것이다. 그림 9 (a)와 (b)에서 보여주는 바와 같이 그리드의 주기가 바뀌에 따라 전자빔의 속도와 가속도의 주기가 바뀌는 것을 제외하고는 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 따라서 위글러의 다른 매개변수의 효과는 방사광의 파장을 변화시키기 위하여 그리드의 주기를 바꾸는 경우에도 그 효과가 바뀌지 않는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 초소형 자유전자 레이저 위글러의 매개변수에 따른 전자빔 궤적을 전산모사를 이용하여 분석하였다. 쌍을 이루는 위글러 간격, 위글러를 구성하는 주기적으로 배열된 그리드의 폭, 깊이, 주기와 그리드에 인가된 전압의 효과를 조사하였다.

그리드의 깊이는 전자빔의 궤적 편향에 큰 영향을 주기 않기 때문에 그리드를 높게 가공할 필요가 없는 것으로 조사되었다. 무엇보다 위글러의 간격이 전자빔 편향 폭에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. 위글러의 간격이 좁을수록 전자빔과의 거리가 가까워서 전자빔을 효과적으로 제어할 수 있다. 다만 위글러의 간격이 너무 좁은 경우 전자빔이 위글러에 충돌할 수 있기 때문에 적절한 간격 조절이 요구된다. 위글러의 간격과 더불어 전자빔의 궤적에 가장 큰 영향을 주는 매개 변수는 역시 그리드에 인가되는 전압으로 확인되었다.



[그림 9] 그리드 주기에 따른 전자빔의 (a) 속도 (b) 가속도.

그리드에 높은 전압이 인가되면 전자빔의 궤적을 효과적으로 제어할 수 있다. 뿐만 아니라 전자빔의 세기가 큰 경우 모든 전자들을 제어하기 위하여 역시 높은 전압이 요구되나 너무 높은 전압은 그리드의 주기가 작을 경우 단락을 유발할 수 있기 때문에 인가전압을 적절하게 조절하는 것이 필요하다. 마지막으로 방사광의 파장을 제어하기 위하여 그리드의 주기를 결정함에 있어, 그리드의 주기가 변화더라도 그리드의 매개변수 효과가 크게 달라지지 않기 때문 방사광의 파장의 조절하기 위한 그리드의 주기는 비교적 자유롭게 조절할 수 있는 것으로 조사되었다.

참고문헌

[1] Sushi Kumar, Benjamin S. Williams, Stephen Kohen, Qing Hu, and John L. Reno, "Continuous-wave operation of terahertz quantum-cascade lasers above liquid-nitrogen temperature", Applied Physics Letters, Vol. 84, pp. 2494-2496, 2004. 4.

[2] M. Schena, D. Shalon, R. Heller, A. Chai, P. O. Brown, and R. W. Davis, "Parallel human genome analysis: Microarray-based expression monitoring of 1000 genes", Proc Natl Acad Sci USA, Vol. 93, pp. 10614-10619. 1996. 10.

[3] M. Nagel, P. Haring Bolivar, M. Brucherseifer, H. Kurz, A. Bosserhoff and R. Buttner, "Integrated THz technology for label-free genetic diagnostics", Applied Physics Letters, Vol. 80, pp. 154-156, 2002. 1.

[4] P. Haring Bolivar, M. Brucherseifer, M. Nagel, H. Kurz, A. Bosserhoff, and R. Büttner, "Label-free probing of genes by time-domain terahertz sensing", Phys. Med. Biol. Vol. 47, pp. 3815-3821, 2002. 11.

[5] S. J. Smith, E. M. Purcell, "Visible light from localized surface charges moving across a grating", Phys. Rev. Vol. 92, pp. 1069-1074, 1953. 11.

[6] F. Floreani, H. W. Koops, and W. Elsaber, "Concept of a miniaturised free-electron laser with field emission source", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 483, pp. 488-492, 2002. 5.

[7] Seungjoon Ahn, Dae-Wook Kim, Ho Seob Kim, Seong Joon Ahn, Jaewon Cho, "Fabrication of a miniaturized electron lens system and laser micro-machining condition for silicon membrane", Microelectronic Engineering, Vol. 69, pp. 57-64, 2003. 8.

[8] 안승준, 김대욱, 김영철, 안성준, 김영정, 김호섭, "초소형 전자칼럼의 제작 및 특성 연구", 한국재료학회지 Vol. 14, No. 3, pp. 186-190, 2004. 3.

김영철(Young-Chul Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 인하대학교 물리학과(이학사)
- 1993년 2월 인하대학교 물리학과(이학석사)
- 2000년 8월 인하대학교 물리학과(이학박사)
- 2001년 8월 충북대학교 박사후연구원
- 2002년 2월 한국표준과학연구원 위촉연구원
- 현재 2003년 9월~현재 선문대학교 신소재과학과 강의교수

<관심분야>

Microcolumn, 전자빔 기술, 디스플레이광학, 빛의 비고전성, 빛의 얽힘성

안성준(Seong-Joon Ahn)

[정회원]



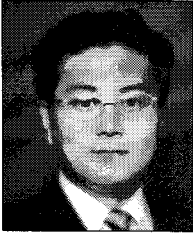
- 1987년 2월 서울대학교 물리학과(이학사)
- 1989년 2월 한국과학기술원 물리학과(이학석사)
- 1992년 8월 한국과학기술원 물리학과(이학박사)
- 1992년 9월 삼성전자 반도체연구소 선임연구원
- 1996년 5월 한전전력연구원 선임연구원
- 현재 2002년 3월~현재 선문대학교 정보통신공학부

<관심분야>

반도체 공정, 광섬유 통신 및 센서, 전자빔 기술, 레이저 미세가공, 접지기술

김 호 섭(Ho-Seob Kim)

[정회원]



- 1984년 2월 인하대학교 물리학과(이학사)
- 1986년 12월 미국 미조리주립대학교 물리학과(이학석사)
- 1992년 5월 미국 미조리주립대학교 물리학과(이학박사)
- 1996년 10월 IBM Watson Research Center 연구원

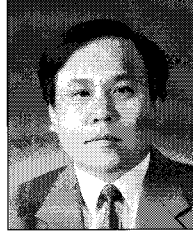
- 1999년 2월 Etec System, Inc 전자빔 리소그래피 설계/제작 팀장
- 현재 1999년 3월~현재 선문대학교 신소재과학과 교수

<관심분야>

전자빔 리소그래피, Microcolumn, Multi microcolumn, 전자빔 기술, 반도체 장비

안 승 준(Seungjoon Ahn)

[정회원]



- 1985년 2월 : 경북대학교 자연과학대학 물리학과(이학사)
- 1989년 2월 : 한국과학기술원 물리학과(이학석사)
- 1993년 2월 : 한국과학기술원 물리학과(이학박사)
- 1989년 2월~1997년 2월 : 삼성 전자 반도체연구소 선임연구원

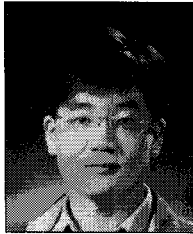
- 1993년 3월~현재 : 선문대학교 자연과학대학 신소재과학과 부교수

<관심분야>

반도체 공정 및 장비기술, 레이저 annealing, 레이저 미세가공, 전자빔 기술, 접지기술

김 대 옥(Dae-Wook Kim)

[정회원]



- 1984년 2월 서울대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)
- 1988년 2월 서울대학교 자연과학대학 물리학과 (이학석사)
- 1992년 2월 서울대학교 자연과학대학 물리학과 (이학박사)
- 1993년 3월~1999년 2월 선문대학교 자연과학대학 물리학과 교수

- 1999년 3월~현재 선문대학교 자연과학대학 신소재과학과 교수

<관심분야>

레이저 스펙트로스코피, 반도체 및 나노과학