

논문 22-10-5

AlN 기판을 이용한 RF 고전력 증폭기 모듈

RF High Power Amplifier Module using AlN Substrate

김승용^{1,a}, 남충모²

(Seung-Yong Kim^{1,a} and Choong-Mo Nam²)

Abstract

In this paper, a high power RF amplifier module using AlN substrate of high thermal conductivity has been proposed. This RF amplifier module has the advantage of compact size and effective heat dissipation for the packaging of high power chip. To fabricate the thru-hole and scribing line on AlN substrate, the key parameters of CO₂ laser were experimented. And then, microstrip lines and spiral planar inductors were fabricated on an AlN substrate using the thin-film process. The fabricated microstrip lines on the AlN substrate has an attenuation value of 0.1 dB/mm up to 10 GHz. The fabricated spiral planar inductor has a high quality factor, a maximum of about 62 at 1 GHz for a 5.65 nH inductor. Packaging of a RF power amplifier was implemented on an AlN substrate with thru-hole. From the measured results, the gain is 24 dB from 13 to 15 GHz and the output power is 33.65 dBm(2.3 W).

Key Words : AlN substrate, CO₂ laser, Microstrip line, Spiral planar inductor, Packaging

1. 서론

최근 반도체 산업의 지속적인 발달은 반도체 소자의 소형화, 집적 회로의 집적도 향상의 고능률 회로를 요구하게 되었고, 이러한 요구에 부응하기 위해 회로 사이의 신호 전달 시간을 줄이기 위한 방법으로 회로간 거리를 줄이는 고집적화 형태, 출력을 증가시킴으로써 신호 전달 속도를 증가시키는 고출력화 형태로 연구가 진행되어 왔다[1]. 특히, 고집적화에 따라 반도체 소자의 회로 단위 면적당 방출하는 열의 증가로 반도체 칩의 온도가 상승하여 회로의 신뢰도 및 수명을 저하시키는 문제점을 가지고 있으며, 반도체 기술의 발달과 더불어 반도체 소자의 발열 밀도 증가와 고밀도 실장

(packaging) 기술로 인한 냉각 기술의 중요성이 크게 부각되고 있으며, 고전력 MMIC 칩에서 발생하는 열을 효율적으로 방출시켜 회로 및 전력 소자들을 보호하기 위해 높은 열전도도를 갖는 기판 및 패키지를 사용해야 할 필요성이 있다[2].

그림 1은 기존의 세라믹 기판을 이용한 종래의 RF 모듈의 개념을 나타낸 것으로, 세라믹 기판 위에 전송선을 형성하고, CuW에 MMIC를 실장하여 와이어 본딩(wire bonding)을 통해 연결되는 구조로 되어있다. 통상, 기존의 구조방식은 MMIC에서 발생하는 열을 CuW 하부로 효과적인 열전달을 할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 최소 2개의 별도 세라믹 기판을 제조하여 실장하는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 기존의 세라믹 기판에 비해 열전도도가 우수한 AlN(aluminum nitride) 기판을 고전력 RF 모듈에 적용하기 위해 AlN 기판의 특성에 대해 연구하였다. 그림 2는 제안된 RF 모듈 구조의 개념을 나타낸 것으로서, AlN 기판 상에 만들어진 전송선, 필요에 따라 평면 인덕터, thru-hole과 MMIC chip을 실장한 통합형 구조이

1. 한국산업기술대학교 지식기반기술-에너지대학원 정보통신학과

(경기도 시흥시 정왕동 2121)

2. 한국산업기술대학교 전자공학과

a. Corresponding Author : kimsy1015@paran.com

접수일자 : 2009. 6. 10

1차 심사 : 2009. 7. 9

심사완료 : 2009. 9. 16

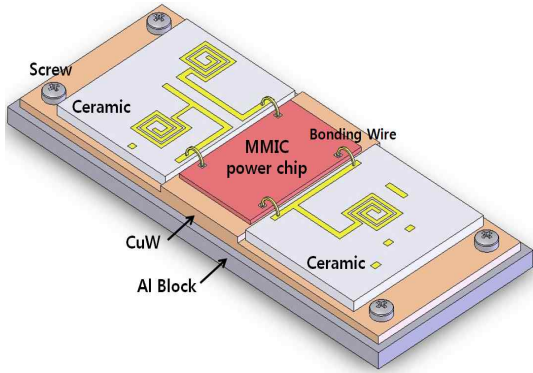


그림 1. 세라믹 기판을 이용한 RF 모듈.
Fig. 1. RF module using ceramic substrate.

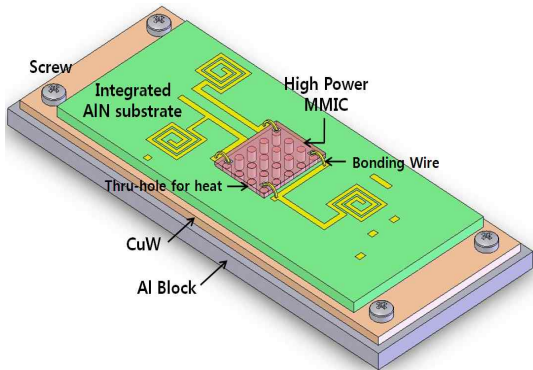


그림 2. 통합된 AlN 기판을 이용한 고전력 RF 모듈.
Fig. 2. High power RF module using integrated AlN substrate.

다. 이러한 방식은 열전도도가 우수한 AlN 기판위에 다양한 종류의 MMIC를 하나의 AlN 기판 위에 실장할 수 있는 장점을 가지고 있다.

2. AlN 기판 공정

AlN 기판에 MMIC로부터 발생하는 열을 CuW 부분으로 전달하기 위한 120 um의 thru-hole 형성을 위해 100 W급 CO₂ 레이저 장비를 이용하였다. thru-hole 형성을 위해 레이저 장비에서의 공정조건은 레이저 빔의 펄스 폭(PW, pulse width), 펄스 주기(PP, pulse period)와 duty cycle 설정이 중요하다[3]. 또한, 레이저 가공에서 Air-blow의 양 또

표 1. Thru-hole 공정 조건.

Table 1. Process conditions for thru-hole.

Process	Parameters	
	Laser hole process	Focus length(mm)
Air blow(l/min)		20
TLT(ms)		100
PP(ms)		0.9
PW(ms)		0.36
	Duty(%)	40

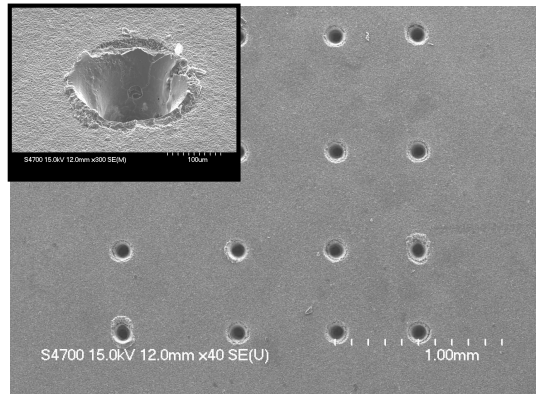


그림 3. CO₂ 레이저를 이용해 AlN 기판에 천공된 thru-hole의 SEM 사진.
Fig. 3. SEM image of thru-holes drilled into AlN substrate using the CO₂ laser.

한 thru-hole에서의 열 손상과 관련하여 매우 중요한 파라미터이다. 마지막으로 레이저가 hole 당 레이저 빔이 조사되는 총 시간(TLT, Total Laser Time)은 hole 가공 공정 시간과 직접적인 영향을 주기 때문에 세심하게 고려되어야 한다. AlN 기판의 thru-hole 형성을 위한 최적의 레이저 장비 파라미터는 표 1과 같다.

그림 3은 실제 AlN 기판 공정 조건에 적용하여 가공된 thru-hole의 SEM 사진을 나타낸 것이며, 삽입된 그림은 한 개의 hole을 확대한 것으로 직경은 약 120 um 정도이다.

집속된 레이저 빔으로 연속된 홈(groove)을 형성을 한 후, 여기에 응력을 가하여 홈을 따라 기판을 절단시키기 위해 스크라이빙 라인(scribing line) 형성 공정도 연구되었다.

양호한 절단을 위해서는 홈의 깊이가 AlN기판 두께의 약 1/4 정도는 되어야 한다. 두께 635 um의

표 2. Scribing line 공정 조건.

Table 2. Process conditions for scribing line.

Process	Parameters	
Laser scribing line process	Focus length(mm)	3
	Air blow(l/min)	50
	TLT(ms)	100
	PP(ms)	0.6
	PW(ms)	0.12
	Duty(%)	20
Stage Velocity(mm/sec)		25

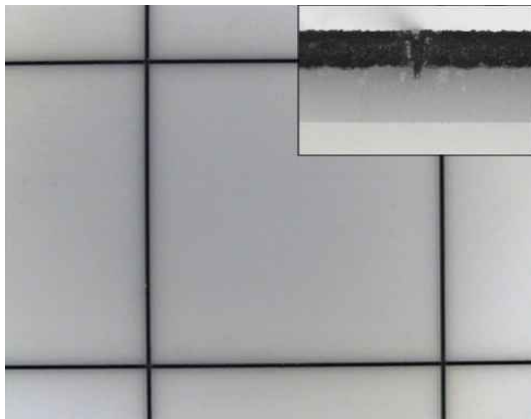


그림 4. AlN 기판에 형성된 스크라이빙 라인의 현미경 사진.

Fig. 4. Microphotograph of scribing line formed on AlN substrate.

AlN 기판에 적절한 스크라이빙 라인 형성을 위해 기판을 이동시키는 X-Y stage의 이송속도가 매우 중요한 데, AlN 기판의 스크라이빙 라인 홈 깊이를 160 μm 이상으로 가공하기 위해서는 X-Y stage의 이송속도가 30 mm/sec 이하로 가공되어야 하며, 표 2는 AlN 기판에 스크라이빙 라인 형성을 위한 공정 조건을 나타낸 것이다. 그림 4는 실제 스크라이빙 공정 조건에서 AlN 기판에 스크라이빙 라인을 형성한 표면 사진 및 단면사진을 나타낸 것이다.

3. AlN 기판의 수동소자 특성

3.1 Microstrip line

AlN 기판에 수동소자 집적 가능성을 검토하기 위해 layout을 설계하여 박막공정을 위한 Cr mask를 제작하였다. 직경 120 μm 의 thru-hole에 Cu 도

표 3. 박막공정 조건.

Table 3. Process conditions of thin film process.

Parameter	
Backside sputtering metal thickness	Ti/Au = 0.2 μm /0.2 μm
Frontside sputtering metal thickness	Ti/Au = 0.2 μm /0.2 μm
Electro-plating metal thickness	Cu/Ni/Au = 3 μm /0.2 μm /2 μm

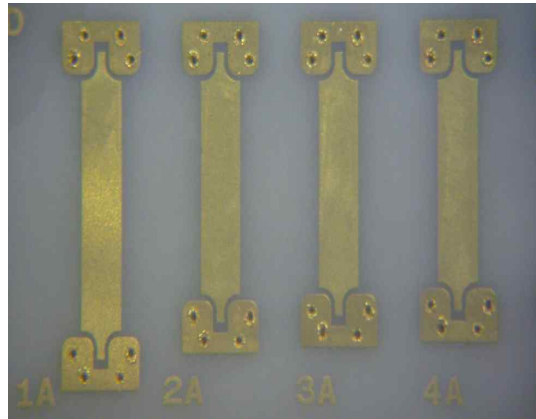


그림 5. AlN 기판에 제작된 마이크로스트립 선로의 현미경 사진.

Fig. 5. Microphotograph of the fabricated microstrip line on AlN substrate.

금을 위한 self-masking 기법을 도입하였고, 표 3의 박막공정 조건으로 그림 5와 같이 AlN 기판 위에 구리(Cu) 도금된 microstrip line을 제작하였다.

제작된 microstrip line의 특성 평가를 위해 Network Analyzer, Probe Station), GSG RF Probe 등을 사용하여 Short-Open-Load-Through(SOLT) calibration을 0.5-18 GHz 대역에서 수행하였고, 제작된 microstrip line의 측정 결과 그림 6과 같이 선폭 720, 780 μm 와 길이 1.8, 3.8 mm의 경우 측정 주파수 대역에서 반사손실이 약 -20 dB 이하로 양호한 결과를 얻었다. 그림 7은 단위 길이 당 microstrip line의 감쇠는 모두 10 GHz 대역기준으로 약 0.1 dB/mm 정도로 매우 양호한 결과를 얻었다.

3.2 Spiral planar inductor

전력증폭기, 필터 등의 RF 회로 성능을 결정하

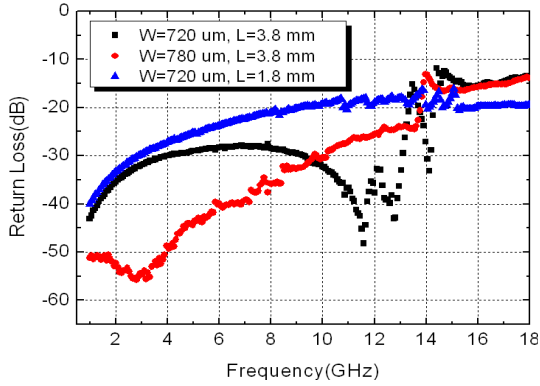


그림 6. 주파수에 따른 마이크로스트립 선로의 반사 손실.

Fig. 6. Measured return loss of microstrip line according to frequency.

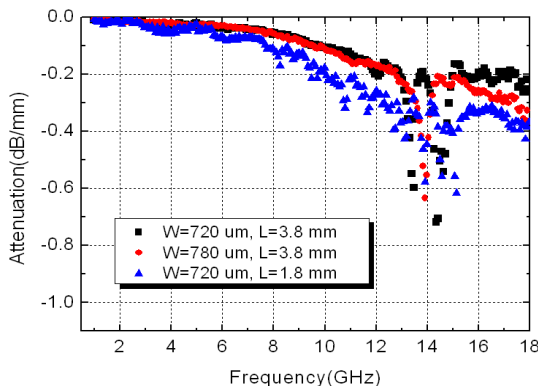


그림 7. 주파수에 따른 마이크로스트립 선로의 감쇠.

Fig. 7. Measured attenuation of microstrip line according to frequency.

는 필수 수동소자 중의 하나인 나선형 평면 인덕터를 제작하였다. 그림 8은 AIN 기판에 와이어 본딩을 이용하여 제작된 인덕터로 선폭 W 240 um, 간격 S 50 um, 내경 1050 um, 권선수 N이 1.5의 나선형 평면 인덕터의 현미경 사진을 나타낸 것이며, Air-bridge를 Au-본딩 와이어로 사용했다.

인덕터의 S-파라미터 특성은 0.1-5 GHz 대역에서 측정하였으며, 일반적으로 나선형 평면 인덕터는 금속 도선 사이에 존재하는 기생 커패시턴스 (parasitic capacitance) 외에도 금속 도선과 기판 사이에 기생 커패시턴스가 존재한다. 따라서 그림 9

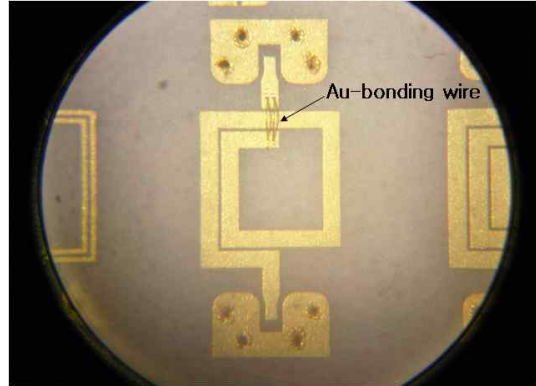


그림 8. AIN 기판에 제작된 나선형 평면 인덕터의 현미경 사진.

Fig. 8. Microphotograph of the fabricated spiral planar inductor on AIN substrate.

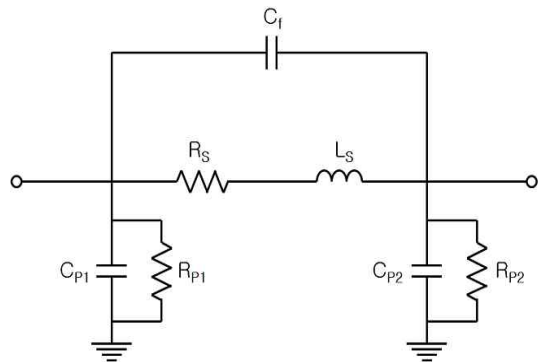


그림 9. AIN 기판에 제작된 나선형 평면 인덕터의 등가회로.

Fig. 9. Equivalent circuit of spiral planar inductor on AIN substrate.

와 같이 나선형 평면 인덕터 부분에 대한 등가회로로서 나타낼 수 있다. 각각의 파라미터는 Agilent EEsof ADS를 이용하여 등가회로의 파라미터 값을 표 4와 같이 추출하였으며, 여기서 L_S 는 5.65 nH로 순수 인덕턴스 값을 의미한다.

인덕터의 품질 계수(quality factor)는 측정된 S-파라미터의 결과로부터 변환시킨 Y-파라미터의 입력 임피던스 값의 허수부와 실수부의 비로 식 (1)과 같이 정의된다.

$$Q = \frac{Im[Z_{in}]}{Re[Z_{in}]} = -\frac{Im[Y_{11}]}{Re[Y_{11}]} \quad (1)$$

표 4. 나선형 평면 인덕터의 등가회로 파라미터.
Table 4. Equivalent circuit parameters of spiral planar inductor.

Parameters	
L_s (nH)	5.65
R_s (Ω)	0.295
C_r (fF)	0.29
C_{p1} (fF)	524
C_{p2} (fF)	416
R_{p1} (k Ω)	5.57
R_{p2} (k Ω)	5.85

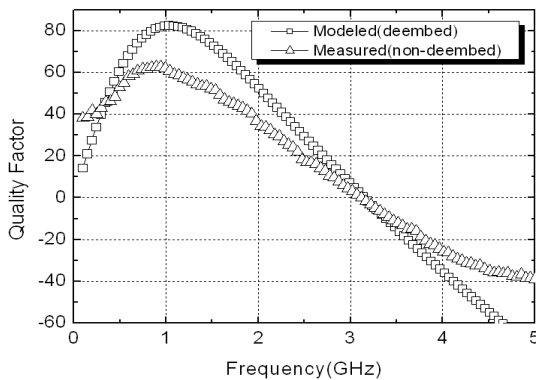


그림 10. 주파수에 따른 나선형 평면 인덕터의 품질 계수.
Fig. 10. The quality factor of the spiral planar inductor according to frequency.

그림 10은 나선형 평면 인덕터의 품질 계수를 디임베드(deembed)하기 전의 측정 결과와 디임베드된 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 디임베드하기 전의 측정 결과는 프로빙을 위한 GSG 패드 및 주변 그라운드의 기생성분이 포함되며, 측정 결과 1 GHz에서 최대 품질 계수가 약 62를 나타낸다. 그러나 디임베드된 시뮬레이션 결과는 실제 인덕터가 배선될 때 프로빙 패드 및 주변 그라운드는 빠지게 되므로 인덕터의 품질 계수는 증가하게 될 것이며, 인덕터의 선폭과 간격 및 내부 직경을 줄이게 되면 최대 품질계수를 나타내는 주파수가 증가될 것으로 예상된다.

4. RF 전력 증폭기 패키징

열전도도가 우수한 AlN 기판에 RF 전력 증폭기를 전기적 열적으로 연결되는 thru-hole 위에 실장

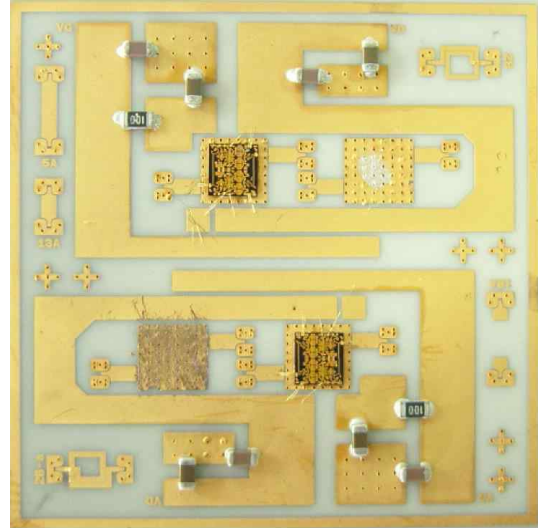


그림 11. AlN 기판에 RF 전력 증폭기가 실장된 사진. AlN 기판의 크기 27 × 27 mm.
Fig. 11. Photograph of the implemented RF power amplifier on AlN substrate. The size of AlN substrate is 27 × 27 mm.

하여 전력 증폭기 특성을 측정하였다.

그림 11은 AlN 기판에 전력 증폭기를 실장하여 제작된 사진을 나타낸 것이다. 제작된 AlN 기판의 전력 증폭기 동작 특성 측정을 위해 $V_d=6$ V, $I_d=1.2$ A의 바이어스 조건에 대해 측정하였다.

그림 12는 전력 증폭기 이득을 측정한 것으로 13-15 GHz 대역에서 약 >24 dB의 측정 결과를 얻었다. 그림 13은 13 GHz 주파수 대역에서 측정된 입력 전력에 대한 출력 전력 특성으로 전력 포화영역에서 33.65 dBm의 출력 전력을 가지며 2.3 W의 출력 전력 특성을 나타내었다.

이러한 측정 결과로부터 전력 증폭기의 데이터 시트(TriQuint TGA2502)와 비교하였을 때 추가적인 방열 구조 없이 AlN 기판에 실장된 전력 증폭기는 우수한 특성을 나타내었다. 따라서 열전도도가 우수한 AlN 기판은 고전력 RF 모듈에서의 활용이 가능할 것이다.

5. 결론 및 고찰

본 논문에서는 열전도도가 우수한 AlN 기판을 이용하여 통합된 고전력 RF 모듈을 제안하고, AlN

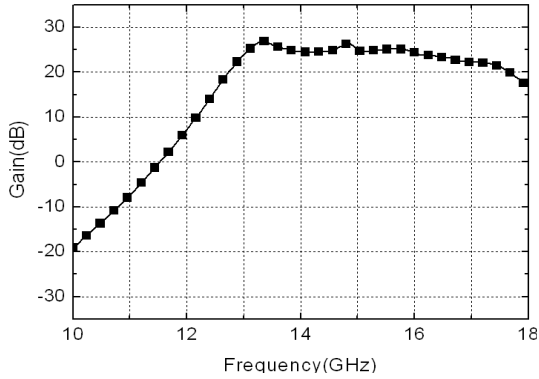


그림 12. 주파수에 따른 전력 증폭기의 이득.
Fig. 12. Measured gain of the power amplifier according to frequency.

기판의 RF 특성을 연구하였다. AlN 기판에 thru-hole 및 스크라이빙 라인 형성을 위해 CO₂ 레이저 장비를 이용하였고, Cu 도금을 통해 AlN 기판에 RF 수동소자를 제작하였다. 측정 결과, 마이크로스트립 선로는 10 GHz에서 0.1 dB/mm의 낮은 전송 손실 및 나선형 평면 인덕터는 1 GHz에서 62의 최대 품질계수 특성을 확인하였다. 또한, AlN 기판에 전력 증폭기를 실장하여 성공적으로 2.3 W의 출력 전력 특성을 얻었다. 향후 열전도도가 우수한 AlN 기판을 이용하여 고전력 RF 모듈에서의 활용이 가능할 것으로 기대한다.

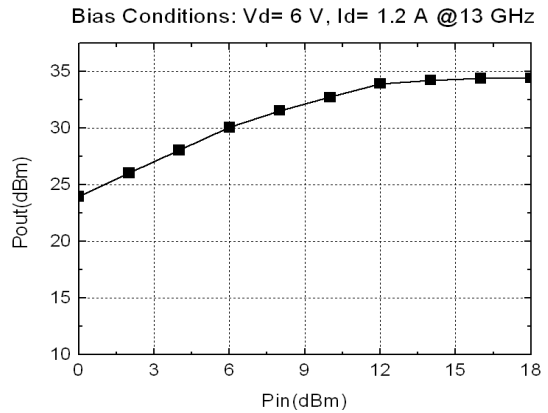


그림 13. 입력 전력에 따른 전력 증폭기의 출력 전력(@13 GHz).
Fig. 13. Output power of the power amplifier according to input power(@13 GHz).

참고 문헌

- [1] R. E. Simons, "Thermal management of electronic packages", Solid State Tech., Vol. 26, No. 10, p. 131, 1983.
- [2] 김원준, 김도경, 김종희, "AlN 세라믹스의 열전도도", 한국세라믹학회, 9권, 6호, p. 621, 1994.
- [3] 김기준, 이종선, 성기천, 양재웅, 이후설, "레이저 원리 및 활용", 대영사, 1997.