

무선 광 전송용 APD 전력 공급기와 원통형 레이저 형상 보정용 마이크로 렌즈 기술

論 文

54D-11-3

The Improved Power Supply for APD and Efficiently Designed Cylindric Micro-lens for a Wireless Optical Transmission System

金 萬 鎬[†]
(MAN HO KIM)

Abstract - An improved power supply for APD(Avalanche Photo Diode) with a received optical power monitoring circuit allows the received optical power increase temporary without of the degradation of the electrical signal. For the cost reduction and simple fabrication, an improved power supply has been proposed that it was designed for driving a APD as a receiving device of a wireless optical transmission system. It was demonstrated that it was possible to improve a dynamic range by compensating the temperature coefficient of the APD up to 1.0 V/°C through the power supply. Also, for an efficient transmission at the receiver end, a simple structure of a single cylindrical micro-lens configuration was used in conjunction with the laser diode to partially compensate a laser beam ellipticity. For this purpose, an astigmatism introduced by the micro-lens is utilized for the additional compensation of the beam ellipticity at the receiver end. In this paper, it is demonstrated that an efficient beam shaping is realized by using the proposed configuration consisting of the single lens attached to the laser diode.

Key Words :Wireless Optical Transmission System, Power Supply, Beam Shaping, Laser Diode, Avalanche Photo Diode

1. 서 론

광섬유(optical fiber)를 사용한 광케이블은 비교적 저렴하고 폭넓은 대역폭을 갖고 있다는 장점으로 인해 기간망의 구축 등에 적극적으로 이용되었고 이러한 광케이블을 통한 광통신이 그간 광통신 분야의 주요 연구과제가 되어왔다. 그러던 중 지난 수년간 인터넷이 폭발적으로 보급되며 통신수요 또한 같이 폭증했고, 보다 고속회선의 가입자망이 요구되어지고 있다. 때문에 기간망 뿐 아니라 가입자망까지도 광케이블로 설치하고자 하는 움직임이 두드러지고 있다.

그러나 광케이블은 그 자체는 비싸지 않지만 그 매설을 위해서는 도로를 굴착해야 하기 때문에 인허가 과정이 복잡하고 엄청난 공사비용이 들어가며 설치하는데도 많은 시일을 필요로 한다. 그래서 대도시의 인구밀집 지역이 아닌 경우 가입자 망으로서 광케이블을 사용하는 것은 여의치 않은 실정이다.

이 때문에 미국, 영국, 이스라엘 등 선진국가들의 한편에서는 본래 보안을 위한 군사용 전송 기술로서 연구하던 기술을 발전시켜서 광케이블을 쓰지 않고 보통의 대기를 채널로 하여 무선으로 레이저광 신호를 전송하는 전송 장비들을 최근에 상용화하기에 이르렀다[1,2].

광통신에서 광송신기와 광수신기가 가까운 거리에서 설

치된 경우는 강한 광신호 때문에 수신기에서 과부하를 일으켜 다이내믹 레인지에 제한을 받을 수 있다. 이 때문에 광케이블을 사용한 광통신에서는 중간에 적절한 감쇄 수단을 설치하여 사용하기도 한다. 그러나 대기를 신호 전달 채널로 사용하는 광전송 시스템에서는 대기류의 변화 및 눈, 비, 안개 등 주변 기상 조건의 변화에 따라 수신되는 광량에 변화가 일어나기 때문에[3,4] 이러한 감쇄 수단의 감쇄율이 주변 환경에 따라 능동적으로 변화하지 않으면 안된다. Table 1에서 기후 조건에 따른 광 파워의 감쇄정도를 보여주고 있다. 문제는 이러한 감쇄기를 만드는 것이 쉽지 않다는 데에 있다. 본 논문에서는 APD에 공급되는 전력을 제어하는 것을 통해 이런 문제를 어느 정도 극복할 수 있는 방안을 제시하고 있다. 특히 이 전력제어는 온도에 따른 APD의 특성 변화를 보상하는 것에 주안점을 두었으며, 이 scheme은 일반 광케이블을 사용한 유선 광통신에서도 사용할 수는 있겠지만 특히 무선 광통신에서의 애플리케이션을 상정하고 연구한 것이다.

또한, 무선 레이저 광통신에서 정보 전송을 위하여 레이저 다이오드를 사용한다. 반도체 레이저 다이오드는 발광부의 단면적이 수~수십 μm 로 대단히 좁기 때문에 평행하고 가는 직선상의 광을 얻을 수가 없다. 그 결과로 회절에 의한 발산이 크기 때문에 수신부의 레이저 빔은 타원형 모양으로 된다. 이 빔을 그대로 전송할 경우, 전송 및 수신부는 원형을 하고 있기 때문에 광 전력의 손실이 커진다. 또한 거리가 멀어질수록 빔의 단면적은 커지게 되므로 전송거리에 제약을 받게 된다. 이 문제점을 해결하기 위해 두가지 방법이 제안될 수 있다. 수신부 렌즈를 크게 하거나 수신부 렌즈 형상을

[†] 교신저자, 正會員 : 울산대학교 시스템공학부 교수

E-mail : jamesmhkim@mail.ulsan.ac.kr

接受日字 : 2005年 6月 28日

最終完了 : 2005年 9月 27日

수신 빔 형태에 맞게 원통형으로 제작하되 단일 마이크로 렌즈의 초점 조정과 정렬을 최적화 한 보정 기술을 이용하는 것이다. 전자의 경우 렌즈 사이즈가 크고 여러 개의 렌즈들이 사용 될수록 개발 비용이 부담스럽게 되므로 이 논문에서 제안한 기술은 단일 원통형 마이크로 렌즈를 사용한 레이저 형상 보정 기술이다.

표 1 기후 조건에 따른 광파워의 감쇠 정도

Table 1. Reduction data of an optical transmission power according to the weather condition.

Fog	Snow (mm/hr)	Rain (mm/hr)	Visibility	dB loss/km
Dense Fog			0m	
Thick Fog			50m	-315.0
			200m	-75.3
Moderate Fog			500m	-28.9
	770m	-18.3		
Light Fog	60	100 (Cloud Burst)	1km	-13.8
Thin Fog	28		1.9km	-6.9
	22		2km	-6.6
Haze	20		2.8km	-4.6
Light Haze	18	25 (Heavy Rain)	4km	-3.1
		12.5 (Medium Rain)	5.9km	-2.0
Clear		2.5 (Right Rain)	10km	-1.1
		0.25 (Drizzle)	18.1km	-0.6
Very Clear			20km	-0.54
			23km	-0.47
			50km	-0.19

2. 무선 광전송용 APD 전력증폭기 기술

2.1. 현 기술의 문제점

광수신기는 광도파로나 자유공간에서 행해지는 광통신에서 광신호를 수신하고, 수신된 광신호를 전기 신호로 변환하여 신호 처리부로 전달한다. 그리고 신호 처리부는 광수신기로부터 전달된 전기 신호를 처리하여 필요한 데이터를 생성한다. 광수신기가 광신호를 수신할 수 있는 다이내믹 레인지(dynamic range)는 주어진 시스템 마진에 대해 허용되는 최소 레벨과 과부하가 일어나기 직전까지의 최대 레벨의 광신호량 범위로 정의되며 일반적으로 광수신기는 제한된 다이내믹 레인지를 갖게 된다.

수광 소자로는 p-n 다이오드, p-i-n 다이오드, APD(avalanche photo diode)등이 사용되는데, 특히 APD는 수광된 빛에 의해 생성된 캐리어를 강한 역바이어스 전압(40 ~ 400V)으로 가속시켜 avalanche 증배를 일으켜 큰 current를 얻을 수 있도록 제작된 소자이다. APD는 P-N 포토 다이오드의 수십~수 백배에 달하는 높은 응답도(responsivity)를 얻을 수 있으며 응답 시간이 매우 짧다는 장점이 있는 반면 불규칙한 전류에 의해 만들어지는 내부 잡음 레벨이 높으며, 온도에 따른 특성 변화가 심하다는 단점을 갖고 있다. 또 APD는 매우 높은 전압에서 구동되기 때문에 적절한 전류

감쇄 수단을 강구하지 않으면 과부하로 인해 소자에 무리가 간다.

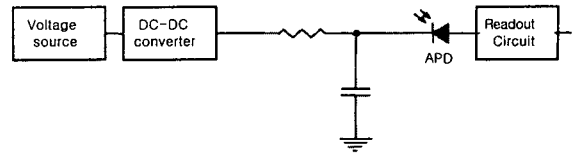


그림 1. APD용 전력공급기의 전형적인 블록 다이어그램

Fig. 1 Block diagram of a typical power supply for an APD.

일반적인 APD용 전력 공급기의 다이어그램은 그림 1과 같다. 보는 바와 같이 APD의 앞단에는 저항으로 된 간단한 전류 제한 회로가 들어가 있다. 이런 scheme에서 입력되는 광신호가 증가하여 APD에 전류가 많이 흐르게 되면 저항에서의 전압 강하가 증가하기 때문에 APD에 인가되는 역바이어스 전압이 줄어든다. 결국 어느 순간에는 APD가 더 이상 avalanche 모드로 동작하지 못하게 되고 이런 현상은 수신기의 다이내믹 레인지를 제한하는 요인이 된다. 또한 이 scheme에서는 온도 변화에 따른 APD의 특성 변화에 대하여 그것을 보상하기 위한 대책도 마련되어 있지 않다.

APD의 이득은 온도가 증가하면 감소하는 경향이 있다. 이는 전계에 의해 가속되는 전자의 mean free path가 짧아지기 때문이다. APD의 이득 M은 다음과 같은 수식으로 주어진다.

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{v_d}{V_{BR}}\right)^n}$$

여기서 v_d 는 인가된 바이어스 전압, V_{BR} 은 breakdown voltage, n 은 1보다 큰, 실험적으로 결정되는 상수로 통상 3 ~ 6 정도의 값을 갖는다. 온도 1°C 변화에 의한 V_{BR} 의 변화량으로 APD의 온도 계수가 정의되며, V_{BR} 의 변화에 따라 APD의 이득도 변화한다. 전형적인 APD의 온도 계수는 0.65 정도의 값을 갖는다.

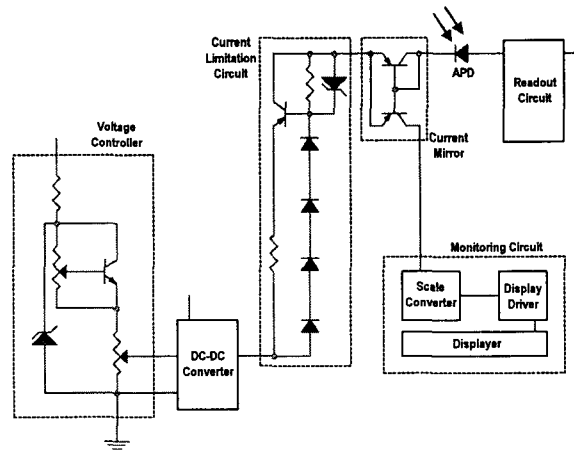


그림 2. 제안된 전력공급기 회로 구성

Fig. 2 Circuit configuration of the proposed power supply.

온도가 증가함에 따라 APD의 이득도 감소하지만, 아울러 APD의 최대소모전력량도 줄어들게 되어 자칫 과부하를 일으키게 될 수도 있는데 이 또한 수신기의 다이내믹 레인지를 제한하는 요소가 된다.

2.2. 제안기술

APD의 이와 같은 온도 특성을 보상하는 방식에는 크게 2가지가 있다. 한 가지는 열전소자를 이용하여 온도 자체를 직접적으로 제어하는 것이고 다른 한 가지는 특성이 변화한 것을 보상해주는 방향으로 소자의 동작 범위에 offset을 가하는 것이다. 본 논문에서 제안하는 것은 후자의 방법[5]을 사용하고 있다.

그림 2는 새로이 제안하는 APD 전력 공급기의 개요를 블록 다이어그램으로 나타낸 것이다. RC로 된 적분 회로 대신에 전류제한 회로와 모니터링 회로를 넣었고 전압원에는 전압제어기를 부착하였다. 실제 각 부의 회로와 그 동작은 다음과 같이 이루어진다.

그림 3은 전압제어회로의 회로도이다. 전압 제어회로는 원래의 전압원에서 나오는 정전압을 온도에 따라 변화도록 만드는 역할을 한다. APD의 온도가 증가하여 이득이 떨어지게 되면 더 높은 전압으로 APD를 구동하여 이득이 떨어지는 것을 막아주는 역할을 하는 것이 이 전압제어회로이다.

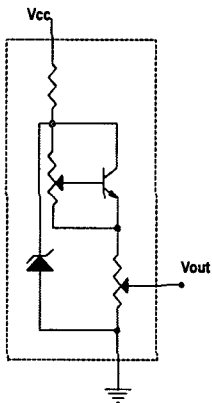


그림 3. Voltage Controller
Fig. 3 A voltage controller.

여기에서는 트랜지스터의 베이스-에미터간 전압이 온도에 따라 변화하는 성질을 이용하여 그 변화하는 정도를 가변 저항으로 이루어진 전압분배기를 통해 증배시켜 출력으로 전달한다.

NPN Si 트랜지스터는 온도가 증가함에 따라 베이스-에미터간의 전압이 감소하는 특성이 있으며 이 온도 계수의 전형적인 값은 약 $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ 정도이다. 만일 온도가 10°C 증가하면 트랜지스터의 베이스-에미터 전압은 20mV 감소하게 되며, 가변저항의 전압 분배비율이 9:1이라고 가정할 때 트랜지스터의 컬렉터-에미터 전압은 200mV 가 감소하게 된다. 이때 역으로 전압 제어회로의 출력으로 나가는 전압은 200mV 가 증가하게 된다.

한편 제너 다이오드가 접지와 컬렉터 사이의 전압을 클

램핑하여 전원부의 불안정성을 줄여주며, 온도 계수가 양의 값을 갖기 때문에 온도 증가에 따라 전압제어 회로의 출력 전압을 증가시키는데 다소의 도움을 준다.

이 전압 제어기의 출력은 다음 단의 직류-직류 변환기에 연결되는데, 직류-직류 변환기는 입력전압을 100여배 이상으로 증폭시키므로 실제 APD에 가해지는 전압에는 수 볼트 이상의 변화가 생기게 된다.

APD의 모델마다 그 특성이 다르기는 하나 온도에 따른 이득 특성의 변화를 보면 통상 10°C 온도 증가할 때 감소한 이득을 보상해주기 위해 보상해주어야 하는 전압은 10볼트 이내이므로 이러한 전압 제어 회로는 충분히 실용적이며 V_{BR} 의 온도 계수를 최대 약 $1\text{V}/^\circ\text{C}$ 까지 보상할 수 있다.

그림 4는 전류제한회로의 회로도이다. 새로이 제안하는 scheme에서는 current limiting circuit은 전압이 APD의 avalanche 모드 동작을 위한 최소 레벨 이하로 떨어지는 것을 막고 APD의 최대 소모 전력량 (maximum power dissipation) 이상의 전류를 일시적으로 흘릴 수 있게 하여 수신기의 다이내믹 레인지를 향상시킬 수 있도록 하고 있다.

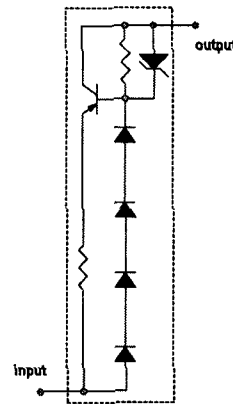


그림 4. Current Limitation Circuit
Fig. 4 A current limitation circuit.

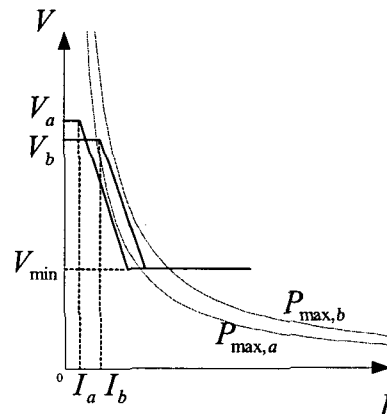


그림 5. 온도에 따른 APD의 최대소모전력과 공급되는 전력의 변화
Fig. 5 Variations of a maximum power consumption and supplied power of an APD as a function of a temperature.

한편 온도가 증가하면 APD의 최대 소모 전력량은 감소하게 되어 수신기의 다이내믹 레인지를 제한한다. (그림 5에서 $P_{max,b} \rightarrow P_{max,a}$) 보통의 전력 공급기를 사용하는 경우 동작의 안정성 확보를 위해 APD의 최대 소모 전력량이 작을 때, 즉 worst case를 기준으로 전력을 공급하고 높을 때는 마찬가지로 남겨 두어야 한다. 반면 제한하는 전력 공급기에서는 APD에 공급되는 전력이 current limiting circuit에 의해 온도에 따라 변화하여 항상 APD의 최대 소모 전력량에 가깝게 함으로써 수신기의 다이내믹 레인지를 향상시키고 있다.

입력이 없는 상태에서 광신호량이 증가하여 전류가 흐르기 시작하면, 처음에는 직렬로 연결된 4개의 다이오드로는 전류가 흐르지 못하고 트랜지스터의 에미터에 연결된 저항으로 전류가 흐른다. 광신호가 조금 더 증가하여 더 큰 전류가 흐르게 되면 어느 시점에서 이 저항에서 일어나는 전압 강하가 4개의 다이오드를 turn on 시킬 수 있는 정도가 된다. 일단 다이오드가 turn on되면 다이오드를 거쳐 제너 다이오드와 병렬로 연결된 저항 쪽으로 전류가 흘러가며 전압강하가 일어난다.

Diode의 turn-on voltage 또한 온도의 함수이며 온도 증가에 따라 turn-on voltage는 감소하게 되고 전압강하가 일어나는 시점도 더 빠르게 되기 때문에 온도 증가에 의해 APD의 최대소모전력이 줄어들더라도 이에 맞춰 공급되는 전력을 줄일 수 있다. 전류 증가에 따라 전압강하가 계속 진행된다면 어느 시점에서는 APD가 avalanche mode로 동작하지 못하게 되는데 그것을 막기 위해 zener 다이오드를 사용하여 이 레벨 이하로 전압이 떨어지는 것을 막아준다.

이상과 같은 회로 동작에서 APD 온도 계수의 보상이 능동적으로 이루어지지만 보상되는 범위(range)를 적절히 세팅하여 전송 장비를 설치해야 한다. 때문에 그를 위해 모니터링 회로가 요구되며 APD 앞에 전류 mirror를 두어 신호 모니터링을 위한 디스플레이부로 APD에 흐르는 전류신호와 같은 신호를 보내어 모니터링을 가능하게 했다. 보상 범위는 전압제어회로에 있는 2개의 가변 저항을 조작하여 세팅한다.

3. 원통형 마이크로 렌즈

레이저 다이오드에서 방사되는 빔은 한 축이 다른 축보다 더 발산하므로 빔 단면이 타원 형상으로 그림 6과 같이 빠르게 발산한다. 광통신과 같은 레이저 다이오드의 적용분야에서는 고출력을 위해서 원형의 빔 단면이 필요하므로, 원형의 빔 단면을 얻기 위해 다양한 광학적인 설계방법이 존재하게 된다[6,7]. 레이저 다이오드의 빔을 원형으로 보정하기 위한 전형적인 광학적 설계 방법은 왜곡(Anamorphic) 프리즘 쌍을 사용하는 것으로 모습은 그림 7과 같으며, 광케이블에 마이크로 렌즈를 붙이는 등 많은 방법이 연구되었다. 본 논문에는 시준과 후전송을 위한 비구면 렌즈 등 추가 장치를 줄이기 위해서 간단한 1개의 원통형 마이크로 렌즈를 레이저 다이오드에 부착하는 그림 8과 같은 scheme을 제안한다[8].

레이저 다이오드에서 방사되는 빔의 Fast축과 Slow축에 대한 발산각과 마이크로 렌즈를 통한 후 발산되는 발산각은, 그림 9에서 보여 주듯이, 다음과 같이 계산 가능하다[7].

$$\alpha_2 = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_0}{n^2} \right) \tag{식 1}$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}(n \sin \theta_1) = \sin^{-1}(\sin \theta_0) = \theta_0$$

단, 여기서 α 는 Fast축에 대한 각도이고, θ 는 Slow축에 대한 각도를 의미한다.

원통형 렌즈를 사용하기 때문에 Fast축에 대한 각도 α 는 보정되고, Slow축에 대한 각도 θ 는 보정이 되지 않으므로 위 두 식을 이용해서 Fast축과 Slow축에 대한 발산각을 원형에 가깝게 조절해 줄 수 있다. Fast축과 Slow축에 대한 발산각의 보정에 의해 초점거리의 변동이 생기게 되며, 초점거리의 차이는 다음과 같이 계산 가능하다[8].

$$\begin{aligned} d_{diff} &= d_S - d_F \\ &= R \left(1 + n - \frac{(n+1) \cos \theta_0}{n \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_0}} \right) \end{aligned} \tag{식 2}$$

단, $d_S > 0$ 이고, $d_F < 0$ 이다.

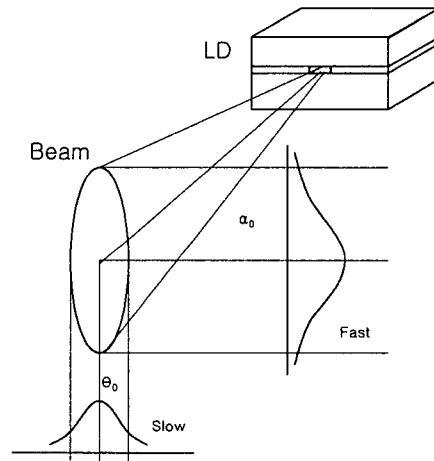


그림 6. 레이저 다이오드의 발산 Beam
Fig. 6 Divergent beam of a Laser diode.

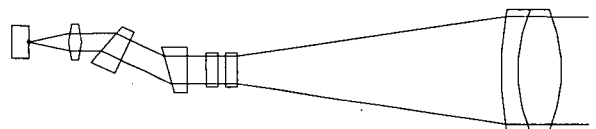


그림 7. 전형적인 광학 설계 방식
Fig. 7 Designed configuration of a typical optical lens for a laser transmission.

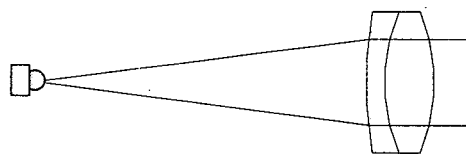


그림 8. 본 논문에서 제안된 광학 설계 방식
Fig. 8 Designed configuration of the proposed optical lens for a laser transmission.

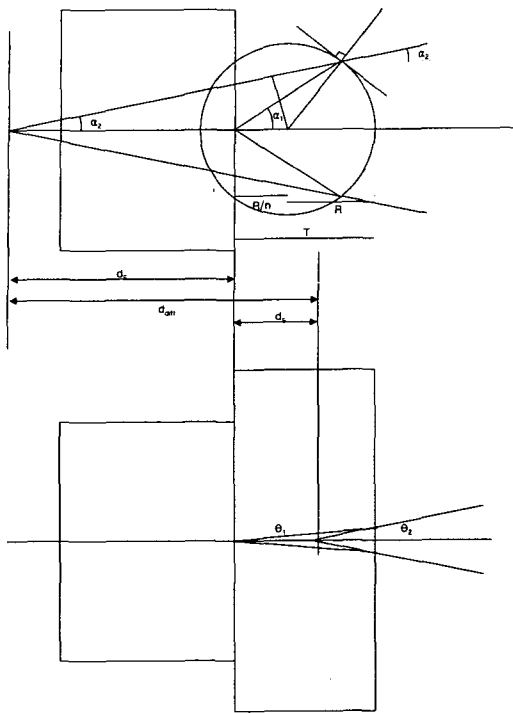


그림 9. Fast축과 Slow축에서 본 광의 전송상태
 Fig. 9 Directions of a transmitted power on a Fast axis and a Slow axis.

즉, 위 식에 의해서 초점 거리의 변화는 Slow축의 입사 각과 관련이 있으며, 초점거리는 R에 비례하는 것을 알 수 있다. 위 식에서 Slow축에 입사하는 각이 커질수록 $\cos\theta_0$ 의 값이 작아지므로, 초점거리는 렌즈의 크기와 굴절율에 의해 결정됨을 알 수 있다. 이 때 식 1에 의해서 렌즈의 굴절율을 선택하게 되므로, 초점거리는 렌즈의 반경 R에 의해 계산 될 수 있으며, R값이 상대적으로 작은 마이크로 렌즈를 사용하므로 초점거리의 차이를 최소화할 수 있다.

4. 결 론

APD용 전력 공급기를 함으로써 전기 신호의 품질 저하 없이 수신 광신호량을 일시적으로 증가시켜 수신기의 다이내믹 레인지를 늘리는 것이 가능하며, 모니터링 회로를 통해 넓은 대역에 걸쳐 수신된 광신호량과 APD 전류를 log 스케일로 모니터링 할 수 있다. 전압 제어기는 APD 이득의 온도에 따른 특성을 보상하여 안정된 감도를 얻을 수 있도록 하며, 직류-직류 변환기(12)는 높은 전압을 APD에 공급하기 위해 낮은 직류 전압을 높은 직류 전압으로 변환한다. 그림2는 APD의 전력 소모가 온도에 따른 최대 허용치에 가깝게 접근할 때 APD 전류를 제한하고, APD 전압이 avalanche 모드로 동작하기 위한 최소값 이하로 떨어지는 것을 막아주는 역할을 한다. APD는 직류-직류 변환기로부터 제한 회로와 전류 mirror를 통해 높은 전압을 공급 받아 구동되며 전류 mirror는 APD로 흐르는 전류와 똑같은 전류를 모니터링 회로에 흐르게 한다. 모니터링 회로의 log 변환기는 전류 신호를 전압 신호로 변환하여 APD전류와 수신광 신호량을 모니터링 기 위한 디스플레이 드라이버로 전달한다. 온도가 증가하면

APD의 최대 소모 전력량은 감소하게 되는데, (그림 5에서 $P_{max,b} \rightarrow P_{max,a}$) 보통의 전력 공급기를 사용하는 경우 동작의 안정성 확보를 위해 APD의 최대 소모 전력량이 작을 때를 기준으로 전력을 공급하고 높을 때는 마진으로 남겨두어야 한다. 반면 제안하는 전력 공급기에서는 APD에 공급되는 전력이 current limiting circuit에 의해 온도에 따라 변화하여 항상 APD의 최대 소모 전력량에 가깝게 함으로써 수신기의 다이내믹 레인지를 향상시키고 있다.

그림 2 에서 제안한 회로를 통해 최대 1.0 V/C 까지 APD의 온도 계수를 보상할 수 있다. 보상이 정교하게 이루어진다고 보기는 힘들지만 충분히 실용적으로 사용할 수 있으며 열전소자를 사용하거나 마이크로 컨트롤러를 사용하는 것에 비해 비교도 안 될 정도로 구성을 단순화하고 비용을 절감할 수 있다.

결론적으로, 무선 레이저 광 전송기의 수신부에 수광소자로 사용되는 APD의 구동을 위한 전력 공급기의 설계방식을 제안하였다. APD의 온도에 따른 특성 변화를 보상하기 위해 온도에 따라 공급전력을 능동적으로 변화시키는 전력공급기로, 구조를 간단하게 하고 생산비용을 낮추기 위해 일반적인 전자부품만으로 회로를 구성하고자 했다. 제안하는 APD용 전력공급기를 통해 최대 1.0 V/C 까지 APD의 온도계수를 보상할 수 있으며 결과적으로 광수신기의 다이내믹 레인지를 향상시킬수 있다.

송광부에 있어서 레이저 다이오드로부터 방사되는 빔의 단면은 발광부의 단면적이 대단히 좁기 때문에 회절에 의한 발산이 커져서 타원형 모양을 하고 있다. 이 빔을 그대로 전송할 경우, 전송 및 수신부는 원

형 빔을 유지하기 때문에 빔과위의 유실이 커진다. 이를 막기 위해 레이저 빔의 형상을 원형에 가깝게 보정하는 기술로서 간단히 1개의 마이크로 렌즈를 레이저 다이오드에 부착하여 레이저 빔 형상을 보정했다. 그림 8에서 보여준 거와 같이 마이크로 렌즈를 레이저 다이오드의 발산각도 조절장치로 사용했을 경우 렌즈 시스템을 간단하게 꾸밀 수 있어 가격도 저렴하고, 렌즈 크기가 작으므로 최소한의 초점거리 차이로, 마이크로렌즈의 굴절률을 이용해서 발산 각도를 조절할 수 있으므로, 자유공간상의 광전송장치와 같이 고에너지 효율이 필요한 분야에 사용하였을 경우에 사용된 레이저 다이오드 특성에 맞게 렌즈를 디자인할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 김만호, 무선 레이저 광 레이저 전송장비 개발, 정보통신산업 기술개발사업 최종보고서, 정보통신부, pp. 122, 2001
- [2] 김만호, 무선 광 레이저 전송 시스템 기술 개발 보고서, (주)에어넷 광전자 연구소, 2002
- [3] M. M. Liu, Principles and Applications of Optical communications (Irwin, 1996) 205
- [4] H. Weichel, Laser beam Propagation in the Atmosphere, SPIE, BB Bellingham, WA (1990)
- [5] 김만호, 애벌란치 포토다이오드용 전력 공급기 및 그 전력공급방법 (등록번호: 100-3903-420000), (대한민국 특

허청, 2003년 6월)

- [6] V. A. Panov, Optics-Mechanics designer reference book(Leningrad, Mashinostroeie, 1980), pp 101~102
- [7] F. G. Smith and T. A. King, Optics and Photonics: An Introduction, John Willey & Sons (2000)
- [8] 김만호, 빔 셰이핑 광학 처리장치, 특허등록 (등록번호: 100-3844-220000), (대한민국 특허청, 2003년 5월)

저 자 소 개



김 만 호 (金 萬 鎭)

1957년 12월 8일 생. 1985년 광운대 전자공학과 졸업. 1986~1989년 Delft University of Technology (공학석사). 1992~1995년 Leicester University (공학박사). 1990~1992 Applied Materials Korea. 1996~2000년 서울대학교 반도체 공동연구소. 2000~2002년 부천대학 교수. 2000~2004년. (주)에어넷 대표이사. 2005~현재 울산 대학교 전기전자정보 시스템공학부 강의전담 교수.

Tel : 052-259-1258 Fax : 052-259-1686

E-mail : jamesmhkim@mail.ulsan.ac.kr