

## 공진형 외부 캐비티 부착 반도체 레이저의 광피드백 장기 안정화

신 철 호

목포해양대학교 해상운송시스템학부 정보전산학전공

(1998년 1월 10일 받음, 1998년 3월 5일 수정본 받음)

본 연구에서는 새로운 광피드백 장기 안정화법을 제안하고 실험적으로 그 가능성을 입증하였다. 제안한 방법은 광로장을 제어하는 방법으로써 지금까지와는 다른 고감도의 광피드백 위상 변별 기법을 도입하였다. 이는 외부 반사체로 사용한 공초점 패브리-페로 공진기의 반사모드의 편광 분광법에 의하여 위상 변별 신호를 얻어내는 것이다. 실험 결과 약 20 시간 정도의 안정된 제어 상태를 유지하였다. 이 실험에서 사용한 광학계가 각각의 분리된 광학 요소를 광학 테이블에 배열한 불안정한 상태였으므로 광학계의 크기를 줄이고 각 광학적 요소를 하나의 판 위에 고정시킴으로서 일체화시킨다면 안정된 제어의 유지시간을 대폭 늘릴 수 있을 것이다.

### I. 서 론

반도체 레이저는 다른 레이저에 비하여 소형, 저전력 소비, 대량생산에 의한 저가격, 고효율, 100만 시간 이상의 장수명, 넓은 범위의 발진파장, 넓은 이득 대역폭, 어레이 구조의 채용에 의한 고�출력 가능, 주입전류에 의한 직접 강도 및 주파수 제어 가능 등의 많은 특장을 갖고 있어서 광통신, 콤팩트디스크의 광원 등을 중심으로 각종 응용 분야에서 가장 널리 사용되고 있다. 그러나, 어떠한 제어도 가하지 않은(free running) 상태에서의 반도체 레이저는 위상잡음(또는 주파수잡음)이 넓은 주파수대역에 걸쳐 대단히 크기 때문에, 바꾸어 말하면, 발진 스펙트럼의 순도가 낮기 때문에 정밀 계측, 원자 물리, 차세대 광통신이라 불리는 코히어런트 광통신 분야에는 직접 사용할 수 없는 실정이다.

이와 같은 배경으로 반도체 레이저의 발진 스펙트럼 순도를 높이는(또는 발진 스펙트럼의 선폭을 좁게 하는) 연구가 전기적 부피드백(negative feedback)에 의한 방법<sup>[1,2]</sup>과 광피드백(optical feedback)에 의한 방법<sup>[3-15]</sup>을 중심으로 진행되어 제어하지 않은 상태에서 수~수십 MHz의 선폭을 수~수십 kHz로 약 1/1000까지 줄이는데 성공하고 있다. 그 중에서도 광피드백법의 경우 광대역의 위상잡음을 줄이는데 효과가 크기 때문에 여러 분야에서 계측 및 실험용 광원으로 많이 사용되고 있다. 그러나, 광학적 피드백의 경우 광로의 불안정에 의하여 안정된 광피드백 상태를 수 분~수십 분 정도의 짧은 시간 밖에 유지할 수 없는 경우가 일반적이다. 이와 같이 광피드백에 의하여 스펙트럼 순도가 높은 광을 얻을 수는 있으나, 그 시간이 너무 짧아 응용상 문제가 되는 경우가 많으므로 광피드백의 장기 안정화가 필요하다.

본 연구의 목적은 새로운 광피드백 장기 안정화 방법을 제안하고 실험적으로 그 가능성을 입증하는데 있다. 광피드백에 의한 반도체 레이저의 선폭을 안정화하는 방법은 기본적으로 반도체 레이저의 외부에 광학적 반사체를 두어 반도체 레이저에서 방사된 광의 일부를 피드백 시키는 것으로 외부반사체로

는 1 매의 반사경,<sup>[3,4]</sup> 광학 격자,<sup>[5,7]</sup> 광섬유공진기,<sup>[6]</sup> 높은 피네스의 공초점 패브리-페로 공진기<sup>[8-15]</sup> 등이 사용되고 있다. 본 연구에서는 공진기를 경사시켜 사용하므로 직접반사광의 재입사를 막을 수 있고, 고피네스의 주파수가 안정된 공진기를 사용할 수 있으므로 좁은 선폭과 비교적 높은 중심주파수 안정화가 동시에 이루어지는 장점을 갖는 고피네스의 공초점 패브리-페로 공진기를 외부반사체로 하는 광피드백 반도체 레이저 시스템을 구축하고, 이 시스템의 장기 안정화를 연구 대상으로 하고 있다.

레이저 발진주파수의 장기 안정화의 방법으로는 반도체 레이저의 공진기 자체의 온도를 전기적으로 제어하는 방법, 광로장을 제어하는 방법, 시스템의 사이즈를 줄이는 방법 등이 있다. 실용적으로는 시스템의 사이즈를 줄이는 방법이 가장 현실적이지만 제작 및 조정이 어렵고, 온도제어법의 경우는 온도센서의 주파수 변별 기능이 아주 낮다는 단점이 있어서 정밀제어가 힘들어서, 광로장을 제어하는 방법과 병행하는 것이 가장 효과적일 것이다. 본 연구에서 채택한 방법은 이들의 복합적인 제어법이며, 광로장 제어에 새로운 고감도의 광피드백 위상 변별 기법을 도입하였다.

T. W. Hansch와 B. Couillaud,<sup>[16]</sup> M. Kourogi와 M.Ohtsu<sup>[17]</sup> 등이 광공진기의 반사모드의 편광 분광에 의하여 얻어진 신호를 레이저의 주파수 안정화 기준 즉, 주파수 변별기로 사용 가능함을 제안한 바 있다. 이들이 제안한 방법은 이 주파수 변별기에서 얻어진 주파수 변화량을 검출하여 전기적으로 레이저를 제어하는 전기적 피드백 방법을 염두에 두고 있다. 본 연구에서는 고피네스의 공초점 패브리-페로 공진기를 외부 반사체로 하는 광피드백 레이저의 경우 공진기를 경사시켜 사용함으로써 공진기의 공진출력광(투과 모드)만이 레이저로 피드백 되도록 하여 직접반사광의 재입사를 막고 있어 반사모드는 사용하지 않고 있는 점에 착안하여 외부공진기 내부에 파장판을 삽입하여 반사모드를 광로장 제어용 광피드백 위상 변별기로써 사용하는 새로운 방법을 제안하고, 이를 실험적으로 입증하고자 한다.

## II. 안정화 시스템의 구성

실험 시스템의 구성은 그림 1과 같다. 그림 상의 광학적 구성요소는 실험의 편의상 각각 별도의 마그네틱 베이스에 장착하여 광학테이블에 배열하였다. 레이저는 일본 히타치사의 0.83  $\mu\text{m}$ 대 반도체 레이저를 사용하였다.

서미스터(thermistor)와 펠티에(Peltier) 냉각기를 각각 센서 및 액츄에이터(actuator)로 하는 온도 제어가 가해진 마운트에 장착된 반도체 레이저로부터 방출된 출력광의 일부가 빔살 가르개에서 피드백용으로 분할되어 광로장 조절용 거울에 반사된 후 공초점 패브리-페로 공진기(CFP)에 입사되고, 여기서 공진된 광이 역경로를 거쳐 반도체 레이저에 재입사하게 되며, 따라서 반도체 레이저는 CFP의 공진 주파수에 잠김과 동시에 광대역의 위상잡음이 큰폭으로 저감되게 된다. 그러나, 온도변화 등의 요인에 의하여 레이저 발진 주파수가 크게 변화하거나, 광로장의 변화로 피드백 광의 위상이 크게 변화하는 경우 록킹 상태에서 벗어나거나, 모드 홉핑 상태 또는 케이오스(chaos)에 근접한 상태를 보이기도 한다. 이 실험에서는 이 현상을 방지하기 위하여 광로장 제어 및 반도체 레이저의 주입전류 제어의 2중 제어를 실시하고 있다. 주입전류를 제어하는 이유는 레이저가 드리프트(drift)성 온도 변화에 의하여 CFP의 공진주파수에서 벗어나거나, CFP 공진기장의 변화에 따른 공진주파수의 변화에 대응하는 제어를 하기 위한 것이다.

반도체 레이저의 주파수 기준이자 외부반사체로 사용한 CFP의 FSR(free spectral range)은 1.5 GHz, 피네스는 30이었으며, 여기서 피네스가 비교적 낮은 이유는 이번 실험에서 사용한 광로장 제어 기준 신호를 만들기 위하여 공진기 내부에  $\lambda/8$  파장판을 삽입하였기 때문이다. 여기서 편광 빔살 가르개(PBS)와 2 개의 광 검출기(포토 다이오드)로 밸런스 검파기를

구성한 것은 광강도 잡음(intensity noise)을 제거하기 위한 것이다.

패브리-페로 공진기의 투과모드는 공진기장의 정수분의 1에 해당하는 파장만을 통과시키는 대역 통과 필터이고, 반사모드는 이의 노치 필터(notch filter)에 해당한다. 위상 변조된 광이 이에 입사하게 되면 위상 변조 성분이 약화된 반송파 성분만 투과하게 되고, 반사 모드の場合は 위상 변조 성분 즉 측파 성분만이 존재하게 된다. 본 실험에서는 이 성분을 광피드백의 위상 변동 검출에 적극적으로 이용하고 있다.

이 실험에서 채택한 광공진기 반사모드의 편광 분광을 위하여는 기준 공진기의 내부에 polarization rotator 또는  $\lambda/4$  파장판을 삽입하게 되며, 공진기로부터의 반사모드광을  $\lambda/4$  파장판을 통과 시킨 후 PBS로 수직편광 성분과 수평 편광 성분으로 분리하여 이를 각각 검출하여 차동 증폭기를 이용하여 광강도잡음을 제거하면 광피드백 위상제어용 신호를 얻을 수 있다. 이 실험에서 외부 광피드백용으로 사용한 외부반사체인 광축에 대하여 비스듬하게 경사시켜 배치한 공초점 패브리-페로 공진기의 내부에  $\lambda/8$  파장판을 삽입함으로써,  $\lambda/4$  파장판을 삽입한 패브리-페로 공진기에서의 수직입사광의 반사모드<sup>[16]</sup>와 동일한 효과를 얻을 수 있다.

그림 2는 이 실험에 사용한 반도체 레이저의 제어하지 않은 상태(상)와 광 피드백 상태(하)의 발진 스펙트럼 선폭을 측정 한 결과이며, 이들의 선폭(반치전폭)은 각각  $\sim 10$  MHz와  $\sim 30$

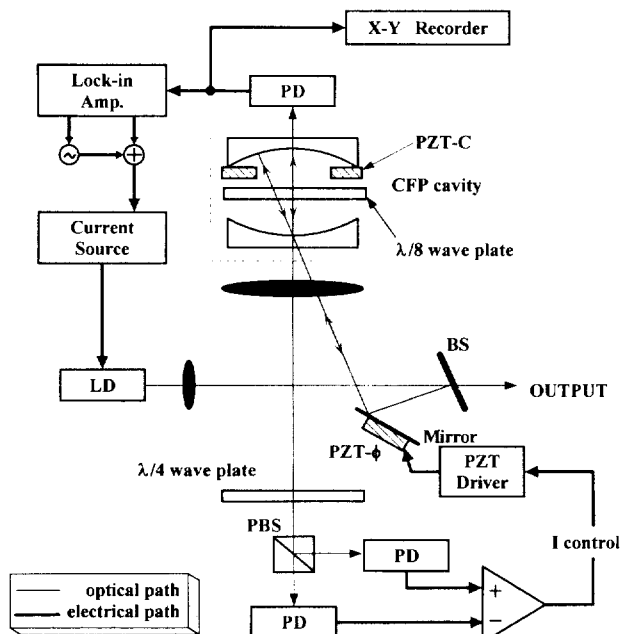


그림 1. 공초점 패브리-페로 공진기 부착 광피드백 레이저의 광 피드백 장기 안정화 실험계.

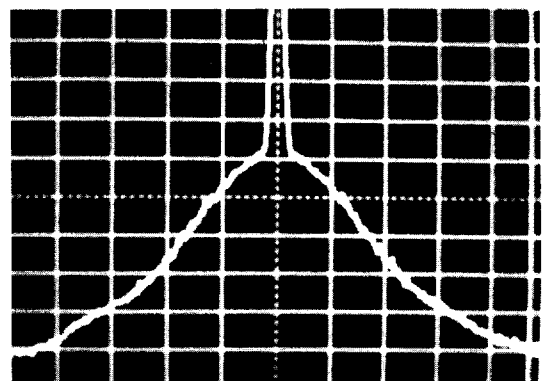
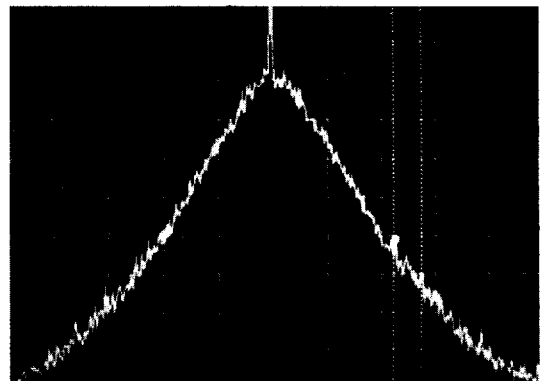


그림 2. 실험에 사용한 반도체 레이저의 제어하지 않은(free running) 상태(상: 횡축 10 MHz/div, 종축 2 dB/div)와 광피드백 상태(하: 횡축 50 kHz/div, 종축 5 dB/div)의 발진 스펙트럼.

kHz를 보였다. 여기서, 선폭의 측정은 길이 10 km의 광섬유를 이용한 자기 호모다인(self-homodyne)법을 사용하였다. 광피드백에 의하여 10 kHz대의 선폭은 비교적 간단하게 얻어지며 이에 대한 분석 연구는 많은 사례<sup>[3-15]</sup>가 있고, 이 연구는 이 상태를 오래 지속시키는데 있으므로 이에 대한 설명은 생략한다.

### III. 실험 결과

그림 3은 피드백 광로장 조절용 PZT의 구동전압을 소인(sweep)하였을 때 CFP 후면의 광검출기와 CFP의 반사광을 이용한 피드백 광로장 제어용 검출기에서 관측되는 광강도의 변화를 각각 측정된 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 광로장 제어용 광검출기에서 관측되는 광강도의 변화는 고감도의 광피드백 위상변별기로 곧바로 사용할 수 있음을 보여 준다.

그림 4는 반도체 레이저에의 주입전류를 소인하였을 때 관측되는 주입전류제어에 사용할 로크인(lock-in) 증폭기의 출력과 CFP 후면의 광검출기에서 관측되는 광강도의 변화를 각각 측정된 것이다. 여기서 피크와 피크 사이가 1 FSR에 해당한다. CFP 후면의 광검출기에서 검출된 결과의 피크치가 일정한 높이로 일정 주파수 범위에 걸쳐 있는 것은 반도체 레이저의 발진주파수가 일정 범위에서 CFP의 공진주파수에 동기(록)됨을 보인 것으로 이 범위가 광피드백의 록킹레인지이다. 이 로크의 범위에서 레이저가 발진되도록 주입전류를 제어하기 위하여는 CFP 후면의 광검출기의 출력 변화를 그대로 사용할 수 없으므로 로크인 증폭기를 이용하여 제어를 한 것이다.

그림 5는 광피드백 상태를 관찰하기 위하여 설치한 X-Y기록기의 출력의 일부를 보인 것이다. 여기서 전부 보이지 않았지만, 약 20 시간 정도의 안정된 제어 상태를 유지하였다. 약 36 시간 동안 모니터링한 결과 두 차례 록 상태에서 일시 벗어난 기록을 볼 수 있었는데, 이것은 실험 테이블에 가해진 일시적인 충격 등으로 피드백 광의 위상에 급격히 큰 변화가

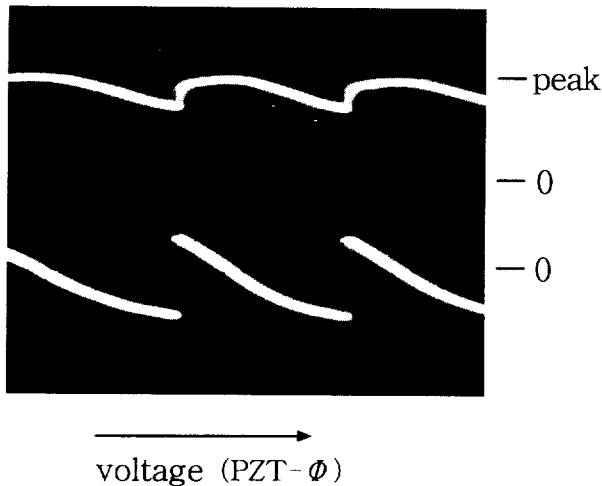


그림 3. 광로장 조절용 PZT 구동 전압(1 μm/30 V)의 소인시 관측한 공초점 패브리-페로 공진기의 출력광의 강도(상)와 광피드백 위상변별기의 출력 신호(하)의 변화(종축은 임의 단위임).

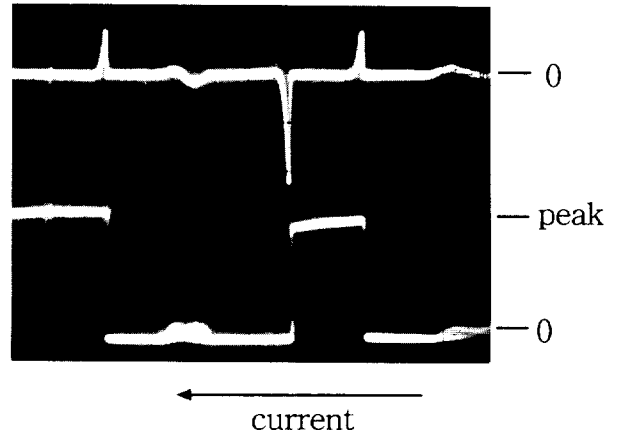


그림 4. 반도체 레이저의 주입전류 소인시 관측한 로크인 증폭기의 출력 신호(상)와 공초점 패브리-페로 공진기의 출력광의 강도(하)의 변화(횡축의 피크간 1.5 GHz, 3 GHz/mA이고, 종축은 임의 단위임).

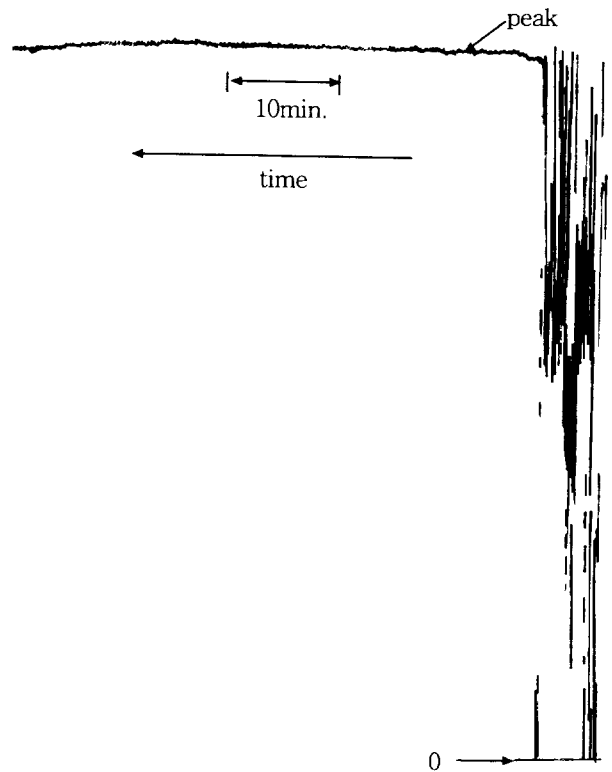


그림 5. 광피드백 상태의 확인을 위하여 공초점 패브리-페로 공진기의 출력광의 강도 변화를 기록한 XY기록기의 출력.

가해 졌기 때문으로 판단된다. 그리고, 실험에 사용한 광학계가 비교적 불안정하였으며, 광학계의 크기를 줄이고 각 광학적 요소를 하나의 판 위에 고정시킴으로서 일체화시킨다면 이 현상을 크게 줄일 수 있을 것이다.

### IV. 결 론

반도체 레이저의 위상잡음 저감을 위하여 많이 사용하고

있는 광학적 피드백의 경우 광로장 변화의 불안정에 의하여 안정된 광피드백 상태를 수 분~수십 분 정도의 짧은 시간 밖에 유지를 하지 못하는 경우가 많다. 따라서, 광피드백에 의하여 스펙트럼 순도가 높은 광을 얻을 수는 있으나, 안정된 피드백 유지 시간이 너무 짧아 응용상 문제가 되는 경우가 많으므로 장기 안정화의 필요가 있다. 본 연구에서는 새로운 광피드백 장기 안정화 방법을 제안하고 실험적으로 그 가능성을 입증하였다. 제안한 방법은 광로장을 제어하는 방법으로써 위상 변별 신호를 외부 반사체로 사용한 공초점 패브리-페로 공진기 반사모드의 편광 분광법에 의하여 얻어내는 지금까지와는 다른 고감도의 광피드백 위상 변별 기법을 도입하였다.

각각의 분리된 광학 요소를 광학 테이블에 배열한 불안정한 광학계로 수행한 이번 실험에서도 약 20 시간 정도의 안정된 제어 상태를 보였다. 따라서, 광학계의 크기를 줄이고 일체화시킨다면 안정된 제어의 유지시간을 대폭 늘일 수 있을 것이다.

이 연구에서 처음으로 시도하고 그 유용성을 입증한 고감도의 광피드백 위상 변별기능을 도입한 광피드백 반도체 레이저의 광피드백 장기 안정화 시스템은 고감도 계측 분야 특히 실험실 수준에서는 활용도가 높을 것으로 판단된다.

**참고문헌**

[1] M. Ohtsu, IEEE/OSA J. Lightwave Technol. **6**, 245 (1988).  
 [2] M. Ohtsu, M. Murata, and M. Kouroggi, IEEE J. of Quan-

tum Electron. **26**, 231 (1990).  
 [3] R.Lang and K. Kobayashi, IEEE J. of Quantum Electron. QE-16, 347 (1980).  
 [4] M. W. Fleming and A. Mooradian, IEEE J. of Quantum Electron. QE-17, 44 (1981).  
 [5] S. Saito, O. Nilsson, and Y. Yamamoto, IEEE J. of Quantum Electron. QE-18, 961 (1982).  
 [6] F. Favre, D. LeGuen, and J. C. Simon, IEEE J. of Quantum Electron. QE-18, 1712 (1982).  
 [7] R. Wyatt and W. J. Devlin, Electron. Lett. **19**, 110 (1983).  
 [8] B. Dahmani, L.Hollberg, and R. Drullinger, Opt. Lett. **12**, 876 (1987).  
 [9] Ph. Laurent, A. Clairon, and Ch. Breant, IEEE J. Quantum Electron. **25**, 1131 (1989).  
 [10] H. Li and H. R. Telle, IEEE J. Quantum Electron. **25**, 257 (1989).  
 [11] C. H. Shin, M. Teshima, M. Ohtsu, T. Imai, J. Yoshida, and K. Nishide, IEEE Photon. Technol. Lett. **2**, 167 (1990).  
 [12] C. H. Shin, and M. Ohtsu, IEEE Photon, Technol. Lett. **2**, 297 (1990).  
 [13] C. H. Shin, and M. Ohtsu, Opt. Lett. **15**, 1455 (1990).  
 [14] 신철호, 한국박용기관학회지 **16**, 10 (1992).  
 [15] C. H. Shin, and M. Ohtsu, IEEE J. Quantum Electron **29**, 374 (1993).  
 [16] T. W. Hansch and B. Couillaud, Opt. Commun. **35**, 441 (1980).  
 [17] M. Kouroggi and M.Ohtsu, Opt. Commun. **81**, 204 (1991).

**Long-term stabilization of optical feedback of a resonant external cavity coupled semiconductor laser**

Chul-Ho Shin

*Dept. of Information and Computer Science,  
 Mokpo National Maritime University, Mokpo, Chunnam 530-729, Korea*

(Received January 10, 1998, Revised manuscript received March 5, 1998)

In this study, a novel long term stabilization method of optical feedback for the resonant cavity coupled semiconductor lasers is proposed, and its utility was shown experimentally. The proposed method is realized by using the phase discriminator of optical feedback with high gain. The phase discriminating signal was obtained by the polarization spectroscopic technique using reflection light from the external reflector, which is a confocal Fabry-Perot cavity. Experimental result shows that stable control state can be maintained up to 20 hours. The period can be increased by reducing size of the system and/or fixing position stably of optical parts used, which were arranged on an optical table by using magnetic bases in this experiment. The proposed long-term stabilization method of optical feedback of a resonant external cavity coupled semiconductor laser is very useful for the field of high sensitivity measurement, and for the use in the laboratory level in particular.