

## PVT공정을 이용한 음향광학 가변 필터용 $\text{Hg}_2\text{Br}_2$ 파우더의 고순도 정제

김태현<sup>1</sup> · 이희태<sup>2</sup> · 권인회<sup>2</sup> · 강영민<sup>2</sup> · 우시관<sup>3</sup> · 장건익<sup>1</sup> · 조병진<sup>1†</sup>  
<sup>1</sup>충북대학교 신소재공학과, <sup>2</sup>그린광학 광학소재그룹, <sup>3</sup>그린광학 우주광학연구소

## High Purification of $\text{Hg}_2\text{Br}_2$ Powder for Acousto-Optic Tunable Filters Utilizing a PVT Process

Tae Hyeon Kim<sup>1</sup>, Hee Tae Lee<sup>2</sup>, In Hoi Kwon<sup>2</sup>, Young-Min Kang<sup>2</sup>, Shi-Gwan Woo<sup>3</sup>,  
Gun-Eik Jang<sup>1</sup> and Byungjin Cho<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Department of Advanced Material Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk 28644, Korea

<sup>2</sup>Optical Material Group, Green Optics, Chungbuk 28126, Republic of Korea

<sup>3</sup>Space Optics R&D, Green Optics, Chungbuk 28126, Republic of Korea

(Received October 25, 2018 : Revised October 25, 2018 : Accepted November 27, 2018)

**Abstract** We develop a purification process of  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  raw powders using a physical vapor transport(PVT) process, which is essential for the fabrication of a high performance acousto-optic tunable filter(AOTF) module. Specifically, we characterize and compare three  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  powders:  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  raw powder,  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  powder purified under pumping conditions, and  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  powder purified under vacuum sealing. Before and after purification, we characterize the powder samples through X-ray diffraction and X-ray photoelectron spectroscopy. The corresponding results indicate that physical properties of the  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  compound are not damaged even after the purification process. The impurities and concentration in the purified  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  powder are evaluated by inductively coupled plasma-mass spectroscopy. Notably, compared to the sample purified under pumping conditions, the purification process under vacuum sealing results in a higher purity  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  (99.999 %). In addition, when the second vacuum sealing purification process is performed, the remaining impurities are almost removed, giving rise to  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  with ultra-high purity. This high purification process might be possible due to independent control of impurities and  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  materials under the optimized vacuum sealing. Preparation of such a highly purified  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  materials will pave a promising way toward a high-quality  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  single crystal and then high performance AOTF modules.

**Key words** acousto-optic tunable filters,  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  powders, PVT, high purification, vacuum sealing.

### 1. 서 론

음향광학 가변 필터(acousto-optic tunable filters, AOTF)와 음향광학 변조기(acousto-optic modulators, AOM)는 초 분광 영상센서의 핵심 모듈로 압전 트랜스듀서와 AOM단결정 소재가 서로 결합되어 구성되어 있고, 음파를 사용하여 빛의 주파수를 변화 및 분해하는 원리를 이용하는 장치이다. 압전 트랜스듀서의 진동은 AOM 소재로 입사된 빛의 회절 특성을 변화시키고, 결국 특정 파

장의 빛만을 회절시켜 나오게 한다. 따라서 AOTF장치에 인가되는 주파수를 변조해 파장 별 회절 신호를 선택적으로 획득하는 것이 가능하다. AOTF장치는 화학/생물학 작용제 같은 독성 물질의 식별 및 탐지 같은 군사 목적 뿐만 아니라 세포의 단층 구조 측정, 광물 탐사, 환경 감시 및 공정제어 등과 같은 다양한 산업 분야에 활용이 가능하다.<sup>1-5)</sup> 기존의 회절격자(grating) 방식의 장치와 비교해 크기가 가볍고 무게를 상당히 줄일 수 있을 뿐만 아니라 낮은 전력으로도 구동이 가능한 장점

<sup>†</sup>Corresponding author

E-Mail : bjcho@chungbuk.ac.kr (B. Cho, CBNU)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이 있다. 또한 편광이 적용된 영상을 제공함으로써 에어로졸을 선택적으로 확인할 수 있기 때문에 원적 식별, 탐지 및 추적에서 월등한 성능을 나타낸다. 심자외선(deep ultraviolet, DUV, ~190 nm)과 장파장 적외선(long wavelength infrared, LWIR, 8-12 μm) 대역의 두 가지 파장 영역에 적합한 소재가 필요하며, 특별히 화학 작용제와 독성 물질과 관련된 방출/흡수 스펙트럼은 주로 8-12 μm LWIR 영역에 집중되어 있기 때문에 관련 파장대를 커버할 수 있는 AOM결정 소재 개발이 필수적이다.<sup>2,3,6-8)</sup> AOM 소재의 광학적 물성에 대한 성능지수(Figure of Merit, M<sub>2</sub>) 지표는 아래의 식으로 표현된다.

$$M_2 = \frac{n_i^3 n_d^3 p^2}{\rho V^3}$$

관련 식에서  $n_i$ 는 입사광의 굴절률,  $n_d$ 는 회절된 광의 굴절률,  $p$ 는 유효 광 탄성계수,  $\rho$ 는 AOM 물질의 밀도,  $V$ 는 음속을 의미한다.<sup>3)</sup> M<sub>2</sub> 성능지수를 만족하는 AOM물질로는 tellurium(Te), thalium arsenide-selenide (Tl<sub>3</sub>AsSe<sub>3</sub>, TAS), mercurous halides(Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub>) 소재들이 있다.<sup>1,9)</sup> 이 중 Te은 가장 높은 성능지수를 나타내지만 밴드갭이 작아 열에 의해 쉽게 활성화되고 기계적 강도가 약해 내구성이 약한 단점이 있다. 한편, TAS는 재료 자체의 독성이 매우 강해 취급 절차가 까다롭고 이 때문에 특수 재료 처리를 위한 막대한 설비 구축 비용이 필요하다.<sup>10)</sup> 반면, mercurous halides계열의 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> 단결정 소재는 광학적 투과 대역이 0.4-30 μm로 상대적으로 넓으며, 복굴절(입사한 빛의 파장이 같더라도 굴절률이 달라 빛이 갈라지는 현상)과 굴절률이 커서 매우 우수한 광학적 특성을 나타내고 있으며 성능지수 또한 Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 단결정의 2.5배로 상당히 크다.<sup>11,12)</sup> Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub>는 tetragonal 구조로서 c축 방향으로 Br-Hg-Hg-Br의 형태를 유지하며 강한 공유결합으로 연결되어 있어 이런 구조적 특성이 광학적 이방성 특성을 발현한다.

공정측면에서 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub>는 녹는점(~405 °C)에 비해 끓는점(~390 °C)이 상대적으로 낮아 승화가 용이하며 이 때문에 physical vapor transport(PVT) 공정을 적용하여 단결정 성장이 가능하다. 한편, 결정 성장 전에 진행되는 원재료 정제 공정은 단결정 품질에 상당한 영향을 미친다. 예를 들면, N.B. Singh 연구팀에 따르면 순도가 낮은 원재료를 이용하여 단결정 성장을 하게 될 경우 색조 현상, 광 산란 및 미세 균열 등과 같은 문제점들을 야기시킨다는 연구결과가 보고되었다.<sup>13)</sup> 하지만, 원료의 불순물을 미세하게 제어할 수 있는 공정기술 방법론에 대한 연구가 부족한 것이 사실이다. 고로, 본 연구에서는 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> 원료 파우더를 PVT 공정을 이용하여 정제를 하였으며 공정이 진행되는 챔버 내부의 진공 조건을 최적화 해 상

당히 높은 순도의 파우더를 획득할 수 있었다. 구체적으로, 고 진공을 계속해서 유지하는 under pumping 조건에서 정제한 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> 파우더와 고 진공 상태에서 밸브를 닫아 진공을 폐쇄하는 vacuum sealing조건에서 정제한 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub>의 결정성 및 조성을 분석하였다. Under pumping 조건 정제 샘플의 불순물 제거율이 높지 않은 반면, vacuum sealing에서 정제한 샘플의 순도는 5N급(99.999%) 이상으로 상당히 높은 순도를 보여주었다. 또한 vacuum sealing과 동일한 조건으로 2차 정제를 했을 때 남아있던 불순물의 대부분이 제거된 것을 보여줌으로써 정제 횟수가 증가할수록 순도를 더욱 좋게 만들 수 있다는 결과를 얻었다. 본 연구에서 개발된 고순도의 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> 파우더는 우수한 결정성과 고품위의 단결정 성장용으로 활용될 수 있으며 궁극적으로 차세대 AOTF 모듈의 핵심 기술로 활용이 가능할 것이다.

## 2. 실험 방법

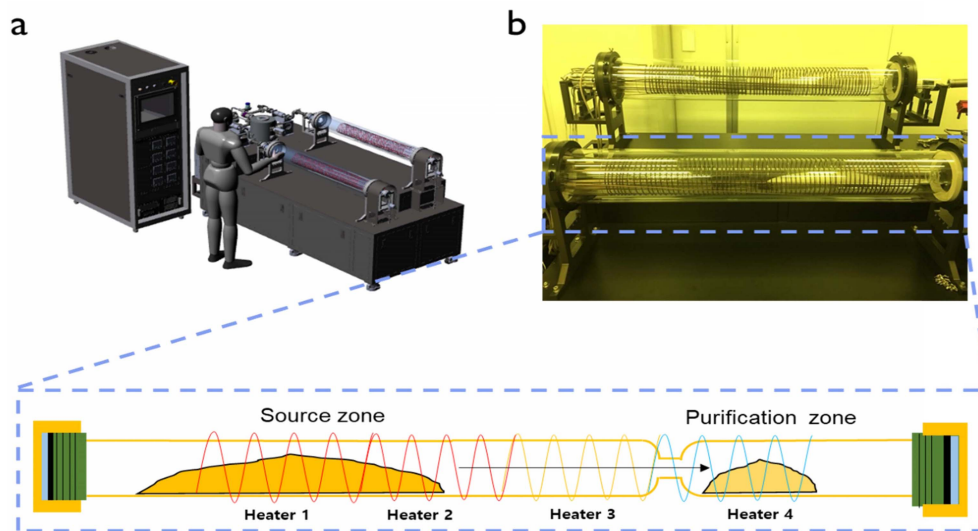
Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> 파우더의 정제 공정을 위해 우선적으로 quartz furnace안에 파우더가 들어가 있는 quartz 앰플이 장입된다. PVT공정을 진행하게 될 furnace는 총 4 구간으로 나뉘어진 히팅 존이 존재하며, 특별히 구간 별 온도를 정밀하게 제어하기 위해 디자인되었다. 앰플 내부 표면의 불순물을 제거하기 위해 고순도의 아세톤(99.99%), 이소프로필 알코올(99.999%), 초 순수(99.999%) 물로 순차적으로 세정하였고, 마지막으로 아세톤을 사용해 잔여 수분을 제거하였다. 그후 앰플은 다시 furnace에 넣은 후 10<sup>-3</sup> torr 이하의 압력에서 1시간 동안 150 °C로 열처리하여 건조시켰다. 정제 앰플에 3N급(99.9%) Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> 파우더를 200 g 넣은 후 흡착된 수분을 다시 한번 완벽하게 제거하기 위해 10<sup>-5</sup> torr 이하의 압력에서 100 °C의 온도로 1시간 동안 건조하였으며, 원료가 장입 되어있지 않은 히팅 존에도 동시에 가열하여 정제가 진행되는 것을 방지하고자 하였다. 2차 건조가 완료되면 300 °C까지 가열시켜 PVT정제공정을 실시하였다. 공정이 진행되는 동안 고 진공을 계속해서 유지하는 방법(under pumping)과 exhaust쪽 furnace의 밸브를 닫아 고 진공 상태에서 폐쇄(vacuum sealing)시키는 2가지의 공정을 비교 평가하였다. 정제 시간은 10시간이며 공정 종료 후 수은 및 2차상의 발생을 막기 위해 1 °C/min의 속도로 천천히 냉각하였다. 정제된 샘플의 특성평가는 XPS(X-ray photoelectron microscopy), XRD(X-ray diffraction)를 통해 정제 후에도 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> 성분의 화합물이 잘 유지되는지를 확인하였고 불순물 종류 및 함량을 확인하기 위해 ICP-OES(inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy)와 ICP-MS(inductively coupled plasma-mass

spectroscopy) 분석을 수행하였다.

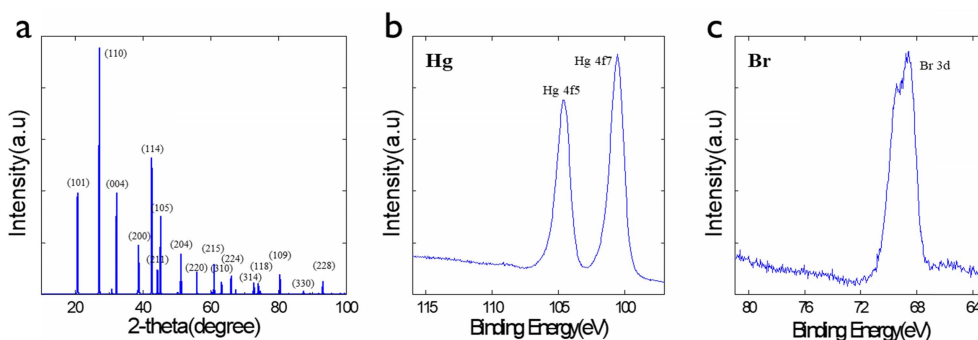
### 3. 결과 및 고찰

Fig. 1(a)의 3차원 모식도처럼,  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  파우더 정제 공정을 위해 고안된 PVT 장치는 온도 및 시간을 조절할 수 있는 전자장치 제어부, 열원 공급 장치부, tube furnace 총 3파트로 구성되어 있다. PVT공정이 진행되는 tube furnace는 총 2개이고 고 진공을 유지하기 위해 rotary pump와 TMP(turbo molecular pump)시스템이 설치되어 있다. Tube furnace는 실제 원료가 로딩되는 source zone과 정제 공정이 발생하여 파우더가 회수되는 purification zone으로 나뉜다[Fig. 1(b)]. 일반적으로 PVT 공정은 SiC 단결정 성장을 위해 주로 사용되어 왔으며  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  파우더의 경우 상대적으로 낮은 온도에서 승화

시킬 수 있기 때문에 동일한 방법이 적용되었다.<sup>13-15)</sup> 정제 과정은 물질의 비중 차와 온도 구배를 이용한다. 승화 온도가 높은 중금속 및 불순물 성분은 기존 source zone에 그대로 남고 승화된  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$ 는 purification zone으로 이동하여 재 결정화 되면 고순도의 정제 파우더를 회수하는 것이 가능하다. 우선적으로, 정제 전 파우더에 대한 XRD와 XPS분석을 진행하였다(Fig. 2). Fig. 2(a)처럼 정제 전  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$ 의 XRD peak 데이터는 JCPDS card에서 관측된 2-theta값과 완전히 동일한 데이터를 얻었다. (110) 방향의 peak가 가장 두드러지며 (101), (004), (114), (105)등의  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  관련 peak도 분명히 검출되었다.  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$ 의 (110) 방향은 다른 방향에 비해 음향 속도(273 m/s)가 낮아 성능 지수가 높으며 정제 후 결정 성장 후에도 상당히 중요한 면이다.<sup>12)</sup> Fig. 2(b), (c)의 Hg 4f5 (104.6eV), Hg 4f7 (100.5eV), Br 3d (68.6eV) XPS



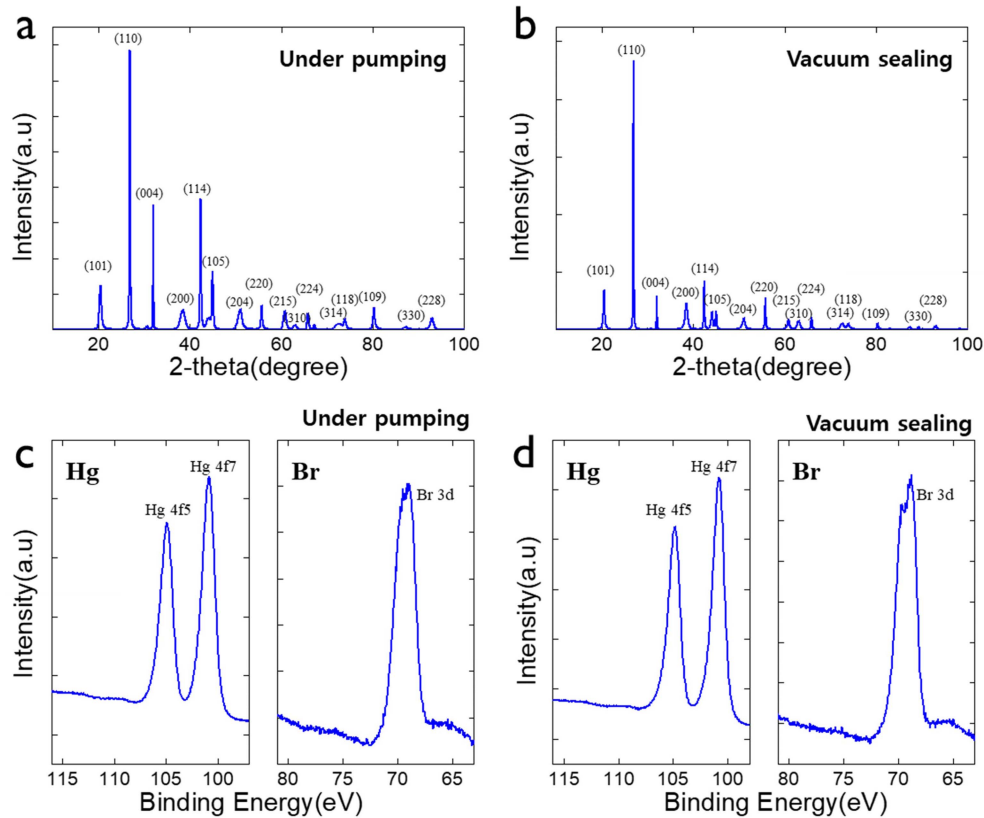
**Fig. 1.** (a) 3D schematic image of PVT system for  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  powder purification process. (b) Optical image of quartz tube inserted into the chamber. Bottom image shows a schematic image of the tube furnace consisting of two zones and four heaters.



**Fig. 2.** Characterization results before purification process of  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  powder sample. (a) XRD spectra of the  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  powder. XPS spectra of (a) Hg and (b) Br. XPS narrow peaks indicate Hg 4f5, 4f7, and Br 3d.

**Table 1.** Concentration of impurities before purification of Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> powder through ICP-OES and ICP-MS analysis(Unit: ppt).

Analytical technique	Impurities							Purity(%)
	Fe	K	S	Si	Cr	Zn	Al	
ICP-OES	964	75700	3950	4210	-	-	-	99.9915
ICP-MS	277	127841	291	6287	31.8	43.7	1640	99.9864

**Fig. 3.** Characterization results after purification process of Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> powder sample. XRD spectra of the Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> powder purified under (a) pumping and (b) vacuum sealing. XPS spectra of Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> purified under (c) pumping and (d) vacuum sealing.

peak들의 위치는 이전 연구결과의 XPS 값과 정확하게 일치하였다.<sup>16,17)</sup> XRD와 XPS 결과를 기반으로 초기 파우더는 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub>소재임을 확인하였다.

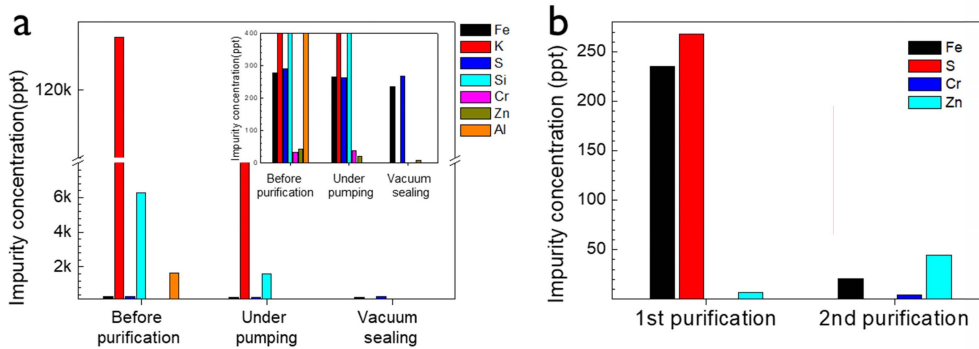
정제 전 파우더의 불순물 종류와 농도는 ICP-OES와 ICP-MS 두 가지 분석을 실시하였다(Table 1). ICP-OES는 분석 샘플에 약 10,000K 상당의 고온을 인가하여 각 원자가 갖고 있는 전자들의 에너지를 여기 시킨 후 다시 낮은 에너지 준위로 떨어질 때 방출하는 빛 에너지를 분광 장비로 분석하는 방법이며 ppb(part per billion) 수준의 미량 원소 분석이 가능하다. 한편, ICP-MS분석법은 아르곤 플라즈마 내에서 이온화된 원소의 질량/전하수 비(m/z)를 질량분석기로 분석하여 ppt(part per trillion) 수준의 극미량 정량 분석을 가능하게 한다. 정제 전 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> 파우더의 불순물 원소로 Fe, K, S, Si 들이 두 가지 분석에서 모두 검출되었다. ICP-OES분석법을 통해

결정된 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub>의 순도는 4N급이지만 ICP-MS분석법에서는 ICP-OES분석에서 검출되지 않았던 초 극미량 불순물들(Cr, Zn, Al)이 검출되어 순도는 3N급으로 낮아졌다. 고로, 본 연구에서는 더 정확한 불순물 정량 분석이 가능한 ICP-MS분석법을 채택하였다.

정제 후에 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> 화합물의 물성이 그대로 유지되는지 확인하기 위해 XRD와 XPS분석을 수행하였다. 승화되는 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> 파우더의 승화 조건을 제어하기 위해 공정이 진행되는 동안 진공을 계속해서 유지하는 방법(under pumping)과 진공을 폐쇄시키는 방법(vacuum sealing)을 적용하여 파우더를 정제하였다. Under pumping과 vacuum sealing 공정 조건에서 각각 정제된 샘플의 XRD 결과 데이터들이 Fig. 3(a)와 (b)에서 확인할 수 있다. 두 개의 결과 값 모두 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> 정제 전 XRD peak의 2-theta 위치와 동일한 것으로 보아 의도하지 않은 화합물의 생

**Table 2.** Concentration of impurities before and after purification(under pumping and vacuum sealing condition) of  $Hg_2Br_2$  powder through ICP-MS analysis(Unit: ppt).

Type	Detection limit(mg/kg), impurities factor							Purity(%)
	Fe	K	S	Si	Cr	Zn	Al	
Before purification	277	127841	291	6287	31.8	43.7	1640	99.9864
Under pumping	265	82175	262	1616	37.1	20.6	-	99.9916
Vacuum sealing	235	-	268	-	-	6.72	-	99.99995

**Fig. 4.** (a) ICP-MS analysis of different  $Hg_2Br_2$  samples(before purification, under pumping, vacuum sealing) For more clarity, the inset of Fig. 4(a) show impurity elements with a concentration less than 400 ppt. (b) Comparison of the residual impurities concentration depending on the number of vacuum sealing purification processes.

성이나  $Hg_2Br_2$ 의 열분해로 인한 심각한 손상은 발생하지 않았다. Under pumping 공정에서는  $Hg_2Br_2$ 가 분쇄된 미립자 파우더 형태로 앰플 벽에 재 결정화 되었다. 획득된 파우더는 정제 전의 파우더 형태와 상당히 유사하였고 이는 XRD분석 결과에서 알 수 있는 것처럼 정제 전 XRD결과와 거의 유사하였다. 반면, vacuum sealing 정제 파우더는 덩어리의 결정 형태로 앰플 바닥에서 수집되었으며 (110) 방향의 peak가 다른 plane보다 더 강하게 관찰되었으며 이런 결과는 결정 성장 샘플의 XRD결과와 유사하다.<sup>18)</sup> Fig. 3(c), (d)의 결과는 각각의 XPS 측정 결과로, 두 개의 결과 값 모두 Hg 4f<sub>5</sub>, 4f<sub>7</sub>, Br 3d의 결과 peak이 정제 전 XPS peak과 동일한 것을 확인할 수 있다. Under pumping 공정 조건에서의 Hg와 Br의 binding energy는 각각 100.8eV, 69.0eV를 나타냈고, vacuum sealing 조건에서는 100.8eV, 68.9eV를 나타냈다. 따라서 정제 전의 XPS 데이터와 큰 유의 차가 없는 것으로 보아  $Hg_2Br_2$  원재료의 화합물 물성이 정제 공정으로 변질되지 않았다고 판단할 수 있다.

$Hg_2Br_2$  파우더의 정제 전후로 불순물 및 순도를 확인하기 위해 ICP-MS분석을 실시하였고 그에 따른 결과는 Table 2에 요약되어 있다. Under pumping 조건 정제 샘플은 불순물 함량 변화가 두드러지지 않았으며 오직 Al 불순물만 검출되지 않았다. 반면, vacuum sealing 조건 정제 샘플의 경우 불순물 함량이 눈에 띄게 감소하였으며 궁극적으로 6N급 순도의 정제 샘플을 획득할 수 있

었다. 고 진공도가 지속적으로 유지되는 under pumping 공정에서는  $Hg_2Br_2$ 내에 혼입된 불순물들은 낮은 온도에서도 승화가 가능해  $Hg_2Br_2$  분자와 함께 이동할 가능성이 높아지고 결국 purification zone에서 재 결정화된다. 하지만, PVT공정이 진행되는 동안 진공을 폐쇄하는 경우에는 승화점에 미치지 못한 불순물들은 source zone에 남아있게 되고  $Hg_2Br_2$ 만 승화되어 purification zone에서 재 결정화된다. Vacuum sealing 조건에서는 순수하게 온도 구배에 의해 생성된 열적 대류만으로 승화된 원료가 이동을 해 제거가 용이한 반면, 진공도가 지속적으로 높아지는 under pumping조건에서는 승화된 분자의 흐름은 무작위적이며 통제가 불가능해 공정 재현성이 좋지 않은 단점이 있었다.

공정 조건에 따라 달라지는 불순물의 종류와 함량을 심층적으로 분석하기 위해 ICP-MS 분석을 실시하였고 관련 그래프가 Fig. 4(a)에 나타나 있다. 원재료의 초기 불순물은 Fe, K, S, Si, Cr, Zn, Al이 검출되었으며, 그중 K은 전체 불순물의 93.7%를 차지하고 Si원소가 4.6% 정도를 차지하였다. 검출된 불순물들은  $Hg_2Br_2$  원료 합성 공정 시 발생된 것으로 판단된다. 정제 전 불순물과 비교했을 때 under pumping정제 샘플의 K 불순물의 함량이 일부 감소했으며 Si과 Al을 제외한 다른 불순물들은 차이가 미미했다. 하지만, vacuum sealing 정제 샘플의 경우 일부 원소를 제외한 대부분의 불순물이 제거된 것을 확인할 수 있었다. 추가적으로 vacuum sealing 정

제 조건을 한번 더 적용한 샘플의 불순물 함량 그래프가 Fig. 4(b)에 나타나 있다. Fe과 S의 함량이 눈에 띄게 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다. 불순물 함량이 약간 증가한 Cr과 Zn의 경우는 두번째 정제를 위해 원료를 앰플로부터 빼고 다시 장입하는 과정에서 발생한 불순물이라고 판단된다. 차후에는 고순도 정제 샘플을 기반으로 고품질의 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> 단결정을 합성하는 공정을 진행할 예정이다. 이는 AOTF 모듈의 특성을 향상시키는 데 있어서 상당한 도움을 줄 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고성능 AOTF 모듈 제작을 위해 필요한 고순도 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> 파우더를 PVT공정을 통해 정제하는 연구를 진행하였다. 구체적으로 정제 공정을 완료한 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> 파우더의 XRD, XPS, ICP-MS 분석을 실시하였다. 대조군으로 정제 전 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub> 파우더, 첫번째 실험군인 under pumping 조건으로 정제한 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub>, 그리고 마지막으로 vacuum sealing 조건에서 정제한 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub>를 각각 분석하여 결과를 비교 평가하였다. XRD, XPS를 통하여 정제 후 원재료의 물성은 거의 그대로 유지되었으며, ICP-MS를 통하여 각각의 순도를 평가한 결과 vacuum sealing의 조건에서 5N급(99.999%) 이상의 높은 순도를 확보하는 것이 가능하였다. 추가적으로 2차 vacuum sealing 정제 과정을 거친 샘플에서는 불순물의 대부분이 제거된 것을 확인하였다. Vacuum sealing 정제 조건의 경우 승화점에 미치지 못한 불순물들은 source zone에 남아있게 되고 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub>만 승화되어 purification zone에서 재결정화되었기 때문에 고순도의 파우더를 얻을 수 있었다. 또한 온도 구배에 의한 열적 대류만으로 원료가 이동하기 때문에 공정 제어가 용이하다. 이런 고순도 파우더는 고품질의 단결정 Hg<sub>2</sub>Br<sub>2</sub>성장을 위해 상당히 중요한 물질 인자이고 궁극적으로 고성능의 AOTF 모듈을 제작하는데 있어서 상당한 도움을 줄 것으로 기대한다.

#### Acknowledgment

This study was supported by the Civil-Military Technology Development Program of the Institute of Civil Military Technology Cooperation funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy, and Defense Acquisition Program Administration(17-CM-DP-02).

#### References

1. N. Gupta, *Acousto-optics and Photoacoustics*, **5953**, 595300 (2005).
2. J. S. Kim, S. B. Trivedi, J. Soos, N. Gupta and W. Palosz, *J. Cryst. Growth*, **310**, 2457 (2008).
3. P. M. Amarasinghe, J. S. Kim, H. Chen, S. Trivedi, S. B. Qadri, J. Soos, M. Diestler, D. Zhang, N. Gupta, J. L. Jensen and J. Jensen, *J. Cryst. Growth*, **450**, 96 (2016).
4. J.-S. Kim, S. B. Trivedi, J. Soos, N. Gupta and W. Palosz, *Imaging Spectrometry XII*, **6661**, 66610B (2007).
5. N. Gupta, R. Dahmani and S. Choy, *Opt. Eng.*, **41**, 1033 (2002).
6. S. E. Harris and R. W. Wallace, *J. Opt. Soc. Am.*, **59**, 744 (1969).
7. I. C. Chang, *Acousto-Optics: Device Dev. Instrum. Appl.*, **90**, 12 (1976).
8. N. Gupta and V. Voloshinov, *Opt. Soc. Am.*, **30**, 985 (2005).
9. J. S. Werner and B. E. Scheffrin, *Handbook of Optics* (2000).
10. J. Xu, R. Stroud, Wiley-Interscience, Vol. 12, New York (1992).
11. N. B. Singh, M. Gottlieb and A. Goutzoulis, *J. Cryst. Growth*, **82**, 274 (1987).
12. D. J. Knuteson, *Opt. Eng.*, **46**, 064001 (2007).
13. N. B. Singh, R. H. Hopkins, R. Mazelsky and J. J. Conroy, *J. Cryst. Growth*, **75**, 173 (1986).
14. Y. M. Tairov and V. F. Tsvetkov, *J. Cryst. Growth*, **43**, 209 (1978).
15. N. B. Singh, M. Gottlieb, A. P. Goutzoulis, R. H. Hopkins and R. Mazelsky, *J. Cryst. Growth*, **89**, 527 (1988).
16. T. Ding, J. R. Zhang, J. M. Hong, J. J. Zhu and H. Y. Chen, *J. Cryst. Growth*, **260**, 527 (2004).
17. S. B. Rahane, R. M. Hensarling, B. J. Sparks, C. M. Stafford and D. L. Patton, *J. Mater. Chem.*, **22**, 932 (2012).
18. H. R. Thirsk, *Proc. Phys. Soc. B*, **66**, 129 (1953).