

InSb 박막의 제작과 특성

조용천 · 문동찬* · 송복식* · 김선태**

자네트시스템연구소, *광운대학교 전자재료공학과

**대전산업대학교 재료공학과

(1993년 5월 1일 접수)

The Properties and Fabrication of InSb Thin Film

Yong Cheon Cho, Dong Chan Moon*, Bok Sik Song*
and Seon Tai Kim**

Garnet system R & D center

*Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University

**Department of Materials Engineering, Taejon National University of Technology

(Received May 1, 1993)

요 약 — 전자빔증착기를 이용하여 적외선영역에서 직접천이형 에너지갭을 갖는 III-V족 2원 화합물 반도체인 InSb 박막을 제작하여 전기, 자기적 특성을 조사하였다. 기판온도 350°C에서 증착된 박막을 425°C의 온도에서 30분 동안 어닐링한 박막은 In₂O₃ 피크가 없어지고, InSb 피크만 나타났으며, 이때의 격자상수 a_0 는 6.49 Å이었다. 기판온도 350°C까지는 InSb 박막의 결정화가 일어나 전자 이동도가 증가하고 비저항은 감소하였다. 자계 0.5~9 kG 범위에서 van der Pauw 방법으로 홀효과를 측정하여 전기, 자기적 특성을 조사하였다. 최적의 조건에서 증착된 박막의 전도형은 n형이었고, 실온에서 캐리어 농도 및 이동도는 각각 $2.55 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $2.83 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ 이었다. 자계가 증가할수록 자계저항은 증가하였고, 9 kG에서 자계저항은 1.98이었다.

Abstract — A binary III-V compound semiconductor, InSb thin film, which has a direct transition energy gap in infrared region, was fabricated by electron beam evaporator and the electrical and the magnetic properties were investigated. The In₂O₃ peak was disappeared in film the InSb thin evaporated at 350°C and only InSb peak was appeared at annealed in 425°C for 30 minutes having the lattice constant of 6.49 Å. When the substrate temperature was increased to 350°C, the electron mobility was also increased and the resistivity was decreased due to the crystallization of the InSb thin film. In the magnetic field ranges of 0.5~9 kG, the Hall effect was measured by the van der Pauw method, the electro-magnetic properties were examined. The conduction type of the evaporated InSb thin film in optimum conditions was n-type, and the carrier concentration obtained at room temperature was $2.55 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ with carrier mobility of $2.83 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$. The magnetoresistance was increased with increasing the magnetic field and the magnetoresistance was obtained 1.98 at 9 kG.

1. 서 론

III-V족 화합물 반도체인 InSb는 Si 및 그 밖의 화합물 반도체에 비하여 월등히 높은 전자이동도를 가지며, 직접천이형이고 좁은 에너지갭인 0.17 eV를 가지므로 3~5 μm의 영역을 갖는 적외선 검출기 및 빠른

전자이동도를 이용한 홀소자로 이용되고 있다[1-3]. 홀 소자는 홀-효과를 이용하여 자체내에서의 자계를 측정할 수 있는 자기센서로서, VTR, 오디오, 정밀 통신기기 등의 소형모터, 직류 브러시리스(DC brushless) 모터의 속도감지 및 제어용으로 사용되고 있다. 홀소자의 특성은 인가되는 자계의 강도에 따라 결정

되는데, 홀전압은 소자의 두께에 반비례하고 전자의 이동도에 비례하기 때문에 전자이동도가 큰 박막재료의 개발이 필요하다[4]. 상기압하에서 순수한 In의 용융점과 끓는점은 각각 155°C 및 2080°C이고, Sb의 경우 630°C 및 1750°C로써, 같은 온도에서 10배 이상의 증기압 차이가 있다. 이와 같은 증기압 차이로 인하여 두 물질의 화학양론적 조성비가 맞는 박막을 제작하기가 힘들다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위하여, Dale 등[5]은 진공 증착된 InSb 박막의 어닐링 효과에 대하여 연구하였으며, Okimura 등[6]은 재결정화 과정을 통하여 전자의 이동도가 한 차승 증가됨을 보고하였다. 또한 최근에는 Si 또는 GaAs 기판위에 분자선 증착(MBE)법으로 InSb 박막을 증착시키는 등 여러가지 연구가 활발히 진행되고 있다[7].

본 실험에서는 전자빔증착기를 이용하여 In과 Sb의 1:1 원자량비보다 Sb를 0.15 wt% 더 첨가하여 기판 온도를 변화시키면서 박막을 제작하였고, 어닐링 조건에 따른 박막의 표면상태 및 X-선 회절을 조사하여 격자상수를 구하였다. van der Pauw 방법으로 홀-효과 측정으로 전기 및 자기적 특성을 조사하였으며, 이러한 특성 조사로부터 제작된 박막들의 홀소자와 자기 환소자 및 적외선 검출기 등의 응용 가능성을 검토하고자 한다.

2. 실험

실험에 사용한 시료는 순도 6N이며, In과 Sb의 조성을 1:1 원자량비로 유지시키기 위하여 전자천평으로 0.1 mg까지 정확히 평량하였다. 이 때 InSb의 화학양론적인 양보다 Sb를 0.15 wt% 더 첨가하여 증기압이 높은 Sb의 재증발로 생기는 Sb의 손실을 최소화하였다. 박막제작에 사용한 기판은 현미경용 유리(76×26×1.3: Gluei Co)를 중성세제로 씻어낸 후 초음파 세척하여 탈 이온수로 20회 이상 세척하였다. 또한, 삼염화에틸렌, 아세톤, 메탄올순으로 세척 후 건조시켰다. 세척된 기판은 증착하기전 1×10^{-4} torr의 진공도에서 기판온도를 400°C로 하여 10분 동안 어닐링하였다. 세척된 기판위에 전자빔증착기(Electron beam Evaporator: Annelva Co., 43)를 이용하여 2×10^{-6} torr의 진공도에서 구조적으로 균일한 표면을 얻기 위해 낮은 증착속도($< 5 \text{ \AA}/\text{sec}$)로 박막을 제작하였다. 박막의 두께는 두께 측정기(Talystep, Taylor-Hobson)

로 보정한 후, 결정 감지기(Crystal sensor: IPN 007-212)에 의해 2 μm 와 3 μm 의 두께를 갖는 박막을 제작하였다. 이 때 기판온도를 상온에서 400°C까지 변화시켜 기판온도에 따른 최적조건을 조사하였다. 이와 같이 증착된 박막을 열화학반응을 거쳐 재결정화시키기 위하여 어닐링 온도를 425°C로 고정시키고, 어닐링 유지시간을 10분에서 30분까지 변화시키면서 어닐링을 행하였다. 전기, 자기적 특성을 조사하기 위하여 실온에서 van der Pauw 방법으로 InSb 박막의 비저항, 홀 이동도 및 캐리어 농도를 구하였고, 자계 변화에 따른 저항변화를 측정하여 자기저항을 조사하였다.

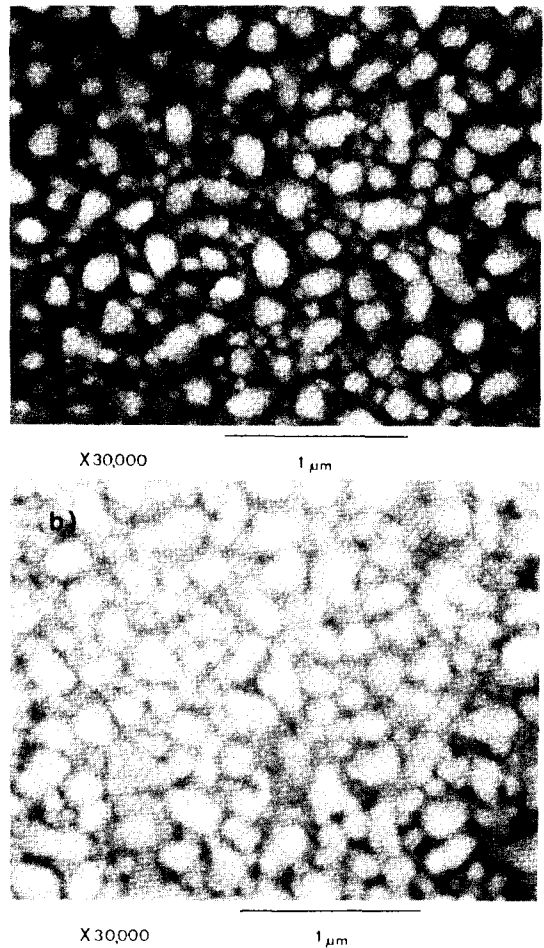


Fig. 1. InSb thin film surface morphology (Thickness 2 μm). (a) Substrate temperature 350°C; (b) Substrate temperature 350°C, annealing temperature 425°C, annealing time 30 min.

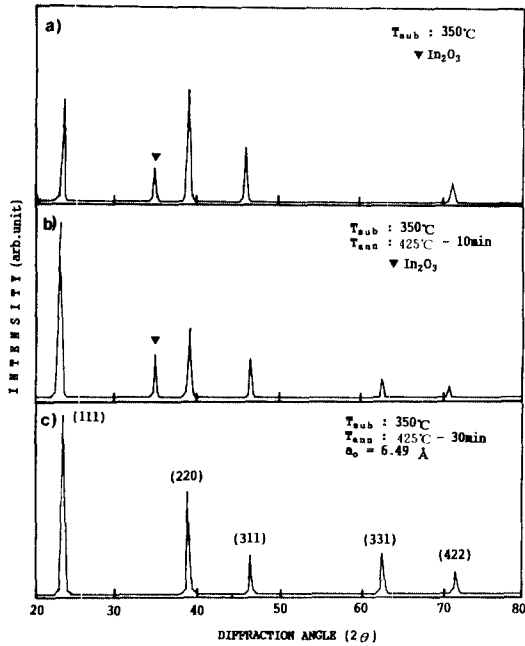


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of InSb thin film. (a) Substrate temperature 350°C; (b) Substrate temperature 350°C, annealing temperature 425°C, annealing time 10 min; (c) Substrate temperature 350°C, annealing temperature 425°C, annealing time 30 min.

3. 결과 및 고찰

전자빔증착기로 진공증착된 두께 2 μm인 InSb 박막의 표면상태를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 기판온도를 350°C로 증착하였으며, 아닐링하지 않은 박막의 표면이고, Fig. 1(b)는 기판온도 350°C, 아닐링 온도 및 아닐링 시간이 각각 425°C, 30분인 박막의 표면사진이다. 기판온도가 300°C 이하에서 진공증착된 박막은 기판과 InSb 박막간의 물리적성질의 차이로 인하여 기판으로부터 쉽게 분리되어 떨어져 나갔으며, 기판온도가 증가할수록 재결정화 과정을 통하여 결정립의 크기는 증가하여 기판온도 350°C일 때 결정화가 일어나 표면이 균일하게 되었다.

Fig. 2는 증착된 InSb 박막의 X-선 회절도를 나타내었다. 기판온도를 350°C로 유지시키고 아닐링하지 않았을 때와 425°C의 온도에서 10분간 아닐링한 시료에서는 (111), (220), (311), (331), (422)의 InSb 피크 외에 회절각 2θ가 35°에서 In₂O₃가 관찰되었다. 아닐링

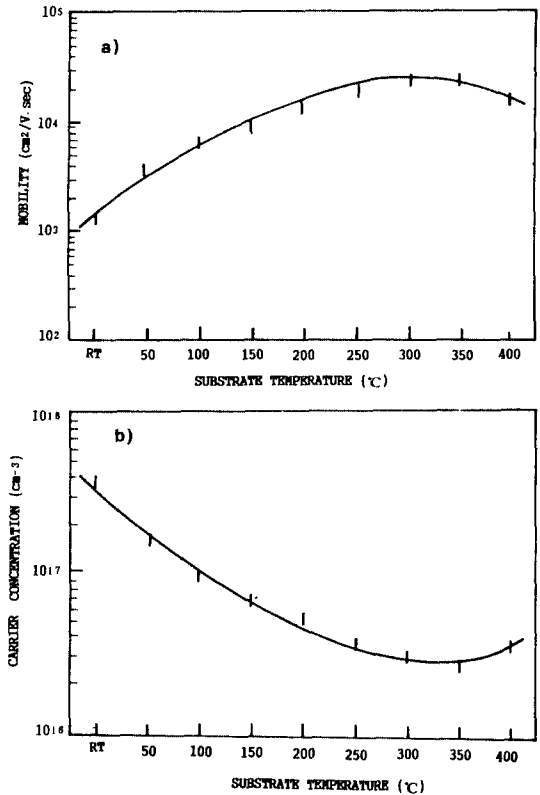


Fig. 3. Electron mobility and carrier concentration with substrate temperature (Thickness 2 μm). (a) Electron mobility; (b) Carrier concentration.

시간을 30분으로 했을 때 In₂O₃의 피크는 사라지고 (111) 방향이 지배적인 InSb 피크가 관찰되었다. 그러나 Okimura 등[6]이 보고한 (101) 방향과 (202) 방향의 In 피크나, Carrol 등[8]의 연구 결과처럼 (220) 방향의 Sb 피크는 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 0.15 wt%의 Sb를 첨가함으로써 재결정화 과정을 통한 Sb의 손실을 보상시켜주면서, Sb 공백(vacancy)이 적은 화학량론적 조성을 갖는 InSb 결정구조가 형성되기 때문이라고 사료된다. 이 때의 격자상수는 6.49 Å이었다.

전자빔증착기로 진공증착된 두께 2 μm인 InSb 박막을 실온에서 van der Pauw 방법으로 홀-효과를 조사한 결과, 전기전도형은 모든 시료에 대하여 n형이었으며, 기판온도가 증가할수록 전자 이동도는 점차 증가하여 350°C일 때 2.17×10⁴ cm²/V·sec으로 최대 값을 나타내었고, 이 때의 캐리어 농도는 5.75×10¹⁶

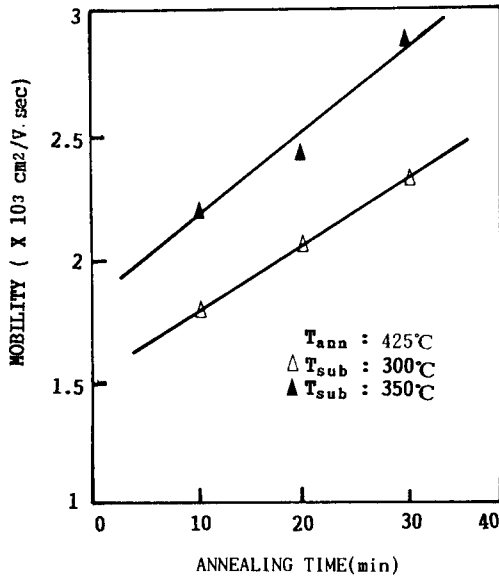


Fig. 4. Electron mobility with annealing time.

cm³이었다. 기판온도를 400°C 이상 증가시켰을 때 전자이동도가 오히려 감소하여 1.82×10^4 cm²/V·sec의 값을 나타내었고 캐리어 농도는 5.41×10^{16} cm³이었고, 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이러한 결과는 Teede가 보고한 단결정 InSb 박막의 전자 이동도인 6.08×10^4 cm²/V·sec보다 낮은 값으로 grain boundary에서 산란으로 인하여 단결정보다 낮은 이동도를 나타내는 것으로 사료된다[9]. 한편, 기판온도가 높아짐에 따라 InSb 박막의 일부에서 결정화가 일어나 전자이동도는 증가한다. 그러나 기판온도가 너무 높으면 InSb 박막 표면으로부터 Sb의 재증발이 일어나 과잉의 In이 존재하게 되며 이들이 전류주입 통로 역할을 하게 되어 Hall potential을 단락시키는 결과가 되어 전자 이동도는 감소하고 비저항이 증가하게 되는 것이다[10].

Fig. 4는 기판온도 300°C, 350°C에서 제작된 InSb 박막을 425°C의 온도로 아닐링시켰을 때, 아닐링 시간에 따른 전자 이동도의 변화를 나타낸 것이다. 기판온도 350°C인 시료를 425°C에서 30분간 아닐링한 결과, 아닐링하지 않았을 때에 비하여 전자 이동도 및 캐리어 농도는 2.83×10^4 cm²/V·sec, 2.55×10^{16} cm³로 향상되었다. 이러한 결과는 아닐링 시간이 짧은 경우 In₂O₃ 성분이 InSb 박막내에서 불순물의 inclusion을 형성하여 전자의 이동도를 감소시키고[6], 아

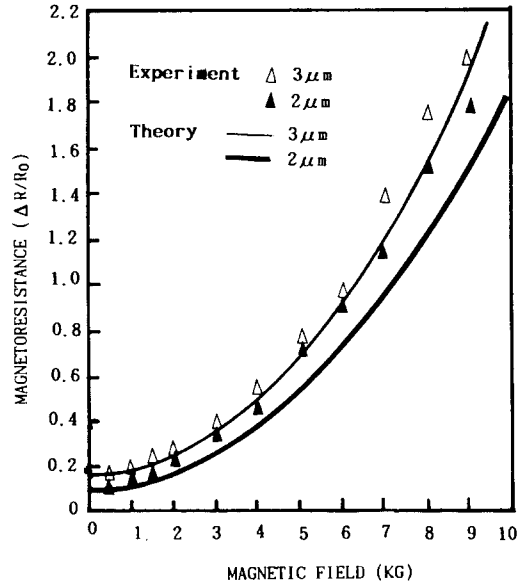


Fig. 5. Dependence of magnetoresistance on magnetic field.

닐링 시간이 길어짐에 따라 In₂O₃가 사라지고 In과 Sb가 서로 반응하여 화학량론적 조성비에 가까운 InSb 박막이 형성되기 때문이라고 사료된다. 이상과 같은 최적의 조건, 즉 기판온도 350°C, 아닐링 온도 425°C, 아닐링 시간 30분에서 제작된 두께 2 μm와 3 μm의 InSb 박막을 이용하여 자계에 따른 자기저항 계수를 조사한 결과치와 이론식과 비교하여 Fig. 5에 나타내었다.

홀소자는 인가되는 전원에 따라 정전압 구동방식과 정전류 구동방식으로 나눌 수 있는데, 정전압 구동방식은 자기저항의 영향을 받게 된다. 기본적으로 홀소자는 전류감응소자이므로 정전압 구동의 경우 소자의 입력저항이 증가하면 입력전류가 감소하므로 홀-전압 특성은 선형에서 벗어나게 된다. InSb를 이용한 자기저항소자는 대단히 감도가 높고 S/N비가 커서 미소한 정보도 검출할 수 있으나, 온도 의존도가 높고 1 kG 이하의 저자계에서 감도가 낮다는 단점이 있다. 자기저항소자와 홀소자는 똑같이 자계의 변화를 전기적으로 바꾸는 작용을 하나, 홀소자는 자계의 변화에 대하여 직선적으로 변하고 자기저항소자는 비직선적으로 변하므로 스위칭 소자로서 사용된다. 자기저항은 저자계에서는 B²에 비례하지만, 고자계에서는 다음과 같은 식으로 간단하게 나타낼 수 있다[11].

$$\frac{\Delta R}{R_0} = K \approx (W/L)[\mu_n B + g(L/W)] - 1$$

여기서 (L/W)는 시료의 길이대 폭의 비이고, B 는 시료에 수직으로 인가한 자계의 세기이며 μ_n 은 전자의 이동도이다. 여기서 자기저항은 인가 자계와 측정시료의 기하학적 형태에 의존하게 되며, 본 연구에서 $g(L/W)$ 는 Lippmann과 Kuhrt가[11] 보고한 값들을 사용하여 구하였다. 저자계 영역에서는 자계의 제곱에 비례하였으며, 고자계에서는 자계에 비례하는 선형특성이 나타났으며, 실험치가 이론치보다 크게 나타났다. 이러한 결과는 grain boundary에서 In 핵형성에 의하여 InSb 박막의 정전단락 현상 때문으로 보고되고 있으며, 이러한 결과는 Clawson과 Wider의 [12]의 연구 결과와 잘 일치하였다. 두께 2 μm 와 3 μm 의 InSb 박막의 자체저항은 9 kG의 자계내에서 각각 1.78과 1.98의 값을 나타내었다. 이러한 값들은 Fujisada[13]가 보고한 벌크 InSb의 값인 20과 비교하면 매우 작은 결과치이나, 이러한 결과는 벌크에 비하여 낮은 이동도 및 불완전한 화학양론적 조성 때문인 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문은 In과 Sb 원소를 전자빔증착기로 진공증착 후 아닐링 과정을 거쳐 InSb 박막을 제작하였다. X-선 회절법으로 InSb 박막의 결정화도를 조사하였으며, 전기, 자기적성질을 규명하고자 van der Pauw 방법으로 비저항, 캐리어 농도 및 전자 이동도 등을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 표면사진으로부터 기판 온도 350°C, 아닐링 온도 425°C, 아닐링 시간 30분일 때 결정립의 크기가 가장 큰 최적의 박막을 얻을 수 있었다.

2. 진공 중에서 InSb 박막을 30분간 아닐링했을 때 In_2O_3 피크는 사라지고 화학양론적 조성에 가까운 InSb 구조가 됨을 X-선 회절분석으로 확인하였으며, 이 때의 격자상수는 6.49 Å이었다.

3. 최적의 조건에서 제작되어진 InSb 박막의 캐리어 농도 및 전자 이동도는 실온에서 각각 $2.83 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ /V·sec, $2.55 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 이었다.

4. 두께 2 μm 와 3 μm 인 InSb 박막의 자체저항은 9 kG에서 각각 1.78과 1.98의 값을 보였다.

참고문헌

1. O. Sugiura, *J. Elec. Mat.* **17**, 11 (1988).
2. P. W. Kruse, *J. Appl. Phys.* **30**, 770 (1959).
3. D. W. Goodwin, *J. Sci. Instr.* **34**, 367 (1957).
4. D. A. Smith, *Semiconductor* 2nd ed. (Cambridge University Press, 1978).
5. E. B. Dale and G. Senecal, *J. Appl. Phys.* **33**, 2526 (1962).
6. H. Okimura, T. Matsumae and M. Ohshita, *J. Appl. Phys.* **66**(9), 4252 (1989).
7. J. I. Chyi, D. Biswas, S. V. Lyer, N. S. Kumor and H. Morkoc, *J. Vac. Sci. Technol.* **B7**(2), 345 (1989).
8. J. A. Carroll and J. F. Spivak, *Solid-State Elec.* **9**, 383 (1966).
9. N. F. Teede, *Solid-State Elec.* **10**, 1069 (1967).
10. M. Isai and M. Ohshita, *J. Appl. Phys.* **55**(4), 941 (1984).
11. H. J. Lippmann and F. Kuhrt, *Z. Naturforsch.* **13a**, 462 (1958).
12. A. R. Clawson and H. H. Wieder, *Solid-State Elec.* **10**, 57 (1967).
13. H. Fujisada, *Report of Researches of the Electrotechnical Laboratory* **791**, 43 (1978) (in Japanese).