

Doping된 GaAs epilayer의 電氣的 特性 研究

高正大* , 金斗哲*

A Study on the Electrical Properties of Doped GaAs Epilayers

Ko Jeong-dae,* Kim Doo-chul*

Summary

Hall measurements of Be doped GaAs epilayer and Sn doped GaAs epilayer grown by MBE were investigated. The reduction of Hall mobility was found to be lessened in proportional to the increase in doping level. The mobilities of Be and Sn doped GaAs epilayer was approximately $300\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ and $4,400\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ at $6 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ respectively. The temperature variation of Hall mobilities were analyzed using theoretical models. The ionized impurity scattering was dominant on all scattering mechanisms in both cases. In the case of Sn doped GaAs epilayer, the impurity segregation effect was observed by AES and C-V measurements.

서 론

Microwave device, FET, IMPATT, varactor 와 mixer diode 등은 submicron 단위의 두께 제어와 정확한 carrier density profile을 요구하고 있다. 여기에 Molecular Beam Epitaxy(MBE) 방법은 매우 평탄한 epitaxial층(Cho, 1971a)을

얻을 수 있고 재현성(Cho, 1971b; Chang, *et al.*, 1973) 있는 박막과 박막 내에서 doping profile(Cho and Reinhart, 1974)을 임의로 변화시킬 수 있어서 이 요구에 부응되는 방법 중의 하나이다.

MBE에서 박막을 submicron order로 변화시키는 것은 성장율을 증감하거나 성장을 시간에 따라 급격히 제어하여 얻을 수 있다. 일반적으로 성장율은 Ga cell 온도를 변화시켜서 제어하고

*자연과학대학 전임강사

불순물의 제어는 epitaxial층을 형성하는 동안 불순물 cell의 온도 및 doping 시간에 따라 이루어진다.

한편 MBE에서는 epitaxial층의 성장온도가 LP E나 VPE보다 낮기때문에 doping된 불순물의 확산이나 surface segregation은 무시한다. MBE에서 GaAs에 doping하는 불순물은 n형 dopant로 Si(Cho, 1971a), Sn(Cho, 1971a), Ge(Cho and Hayashi, 1971) 등이 쓰인다. 그외에 Zn (Arthur, 1974)은 낮은 부착계수를 가지고 있고 Te은 surface segregation 효과가 크기 때문에 부적절함이 밝혀졌다 (Cho and Arthur, 1975).

한편 MBE에 의한 GaAs 및 $Al_xGa_{1-x}As$ 성장시 p형 불순물로 쓰이는 것은 Be, Mn, Ge, Zn 등이 있다. Mn은 As 안정화 조건으로 성장할 때 널리 쓰이나 Ga과 상호작용하여 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 이상의 acceptor level에서는 3차원 핵성장용 하므로 morphology에 영향을 주고 더욱이 가전자대 위의 약 130meV에서 deep level로 작용하여 실온에서는 불순물 모두가 이온화되기는 어렵다. Ge은 GaAs epi층에서 amphoteric 현상을 나타낸다. 즉 As 자리에 들어간 Ge은 acceptor로 작용하고 Ga자리에 들어간 Ge은 donor로 작용한다. 그러므로 MBE 성장시 As flux比를 조절하여 p-n 접합을 in situ에서 한가지 불순물로 만들기도 한다. Zn은 부착계수가 0이므로 MBE의 effusion cell만으로는 doping이 어렵고 이온화하여 주입한다. Be은 MBE에 의한 GaAs 성장시 불순물로 혼입시키면 segregation 현상이나 확산 효과가 없는 이상적인 acceptor로 작용한다.

본 연구에서는 MBE에 의해 epitaxial 층을 성장시키면서 n형 dopant로 Sn을 doping하고 p형 dopant로 Be을 doping하여 doping level에 따른 mobility의 변화와 carrier depth profile 및 표면의 AES 관찰을 통해 doping 효과를 조사하였다.

材料 및 方法

시료는 Cr-doped GaAs(Sumitomo electric Co.)의 반결연성 기판 위에 MBE 방법에 의해 불순물을 doping하였다. MBE로 성장된 기판은 $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O = 6 : 1 : 1$ 의 에칭용액으로 90초간 shaking 방법으로 화학적 에칭을 하였다. 자세한 process는 Fig. 1과 같다.

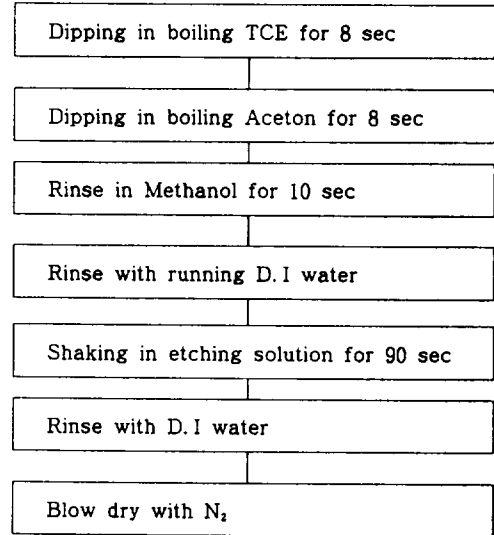


Fig. 1. Substrate etching process.

세척이 끝난 기판은 UHV의 MBE 성장실에서 590°C로 기판온도를 유지하고 doping cell의 온도를 여러가지로 변화시키면서 doping level을 제어하였다. 이때 parameter는 Table 1과 같다.

Table 1. Growth parameter and range

growth parameter	range
substrate temperature	590°C
growth rate	$0.34 \mu\text{m h}^{-1}$
Be doping level	$10^{16} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Sn doping level	$10^{15} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
surface stoichiometry during growth	As stable (100) (2×4)

성장된 시료는 UHV system에서 끌어내어 Fig. 2와 같은 cleaning 순서를 가졌다.

Shottkey barrier를 형성하기 위해 10^{-5} 에서 Torr에서 Au를 약 2000Å 두께로 증착시켰다. 또한 ohmic contact을 위해서는 Au/Ge: Ni을 약 200Å 증착시킨다음 curve tracer로 확인하여 microcomputer로 동작되는 C-V profiler 및 Hall 장치로 그 특성을 조사하였다. 이때 Hall 측정은 van der Pauw 방법을 이용하였다.

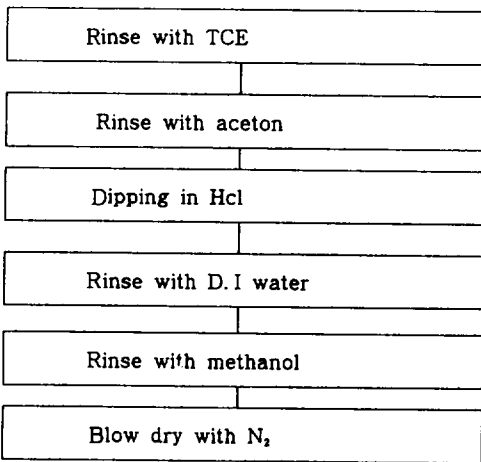


Fig. 2. Sample etching process for electrode contact.

結果 및 考察

Sn이 정확히 doping 되었는지의 여부를 알아보기 위해 $6 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 로 Sn을 doping하고 표면을 AES로 확인하였다. Fig. 3은 1086eV의 Ga LMM 천이와 1220eV의 As LMM 천이를 나타내며 430eV의 Sn MNN 천이를 나타내고 있다. 이 그림으로부터 epi층 성장이 이루어졌다는 것을 확인할 수 있고 불순물에 오염되지 않은 깨끗한 면임을 알 수 있었다.

이때의 표면상태를 앞서와 같은 조건으로 RHEED로 관찰한 결과 Fig. 4와 같았다. Fig. 4는 streak pattern으로 표면이 평탄하고 질이 좋은

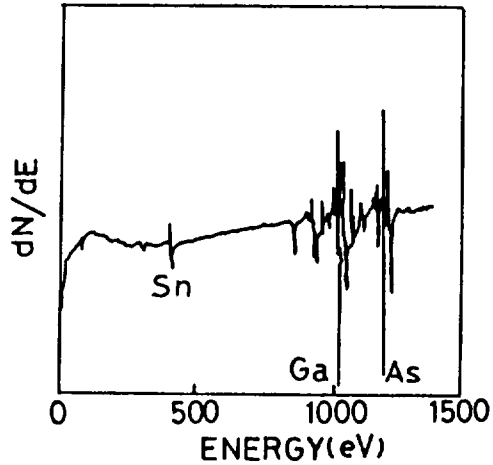


Fig. 3. Auger spectrum from GaAs.

Substrate after exposure to a Sn flux of $1.2 \times 10^{12} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ for 3×10^3 sec at 590°C.



Fig. 4. RHEED pattern after growing E-beam incident in [100] azimuth.

결정임을 보여주고 있다.

이러한 시료를 Hall 장치로 측정하여 Fig. 5와 같은 결과를 얻었다. 그림에서 실선은 Rode와 Night의 이론적 계산에 의한 것이고, 점은 측정치를 나타낸다. Hall mobility는 Sn 농도가 증가함에 따라 감소하는 이론에 접근하나 10^{18} 이하가 되면 이론적 곡선에서 많이 벗어나게 된다. 이것은 donor가 $7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 보다 낮을 때 residual carbon이 acceptor로 작용하여 다수 carrier mobility에 영향을 미쳤기 때문이다 (Ploog, 1980).

한편 C-V 특성을 조사한 결과가 Fig. 6이다.

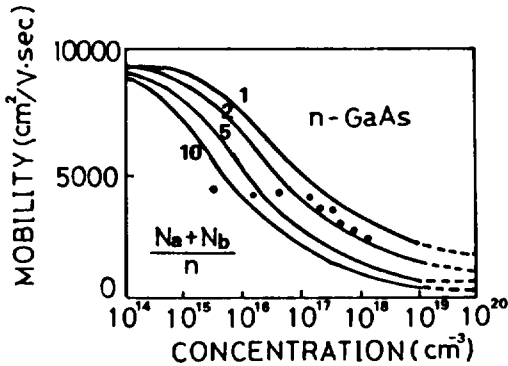


Fig. 5. 300K Hall mobility as a function of free electron concentration in MBE grown GaAs films doped with Sn.

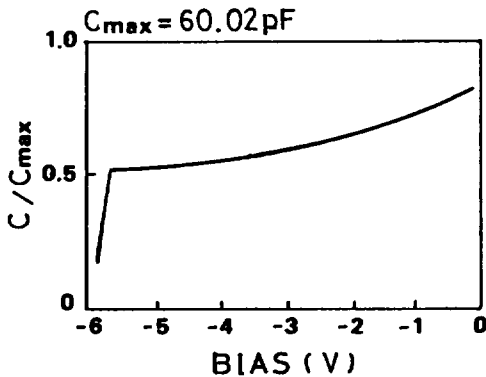


Fig. 6. C-V characteristics of Sn doped GaAs epitaxial layer.

여기서 $1/C^2$ 대 역bias를 plotting하여 Fig. 7과 같은 결과를 얻었고, 직선의 기울기와 절편으로부터 Fig. 8과 같은 doping profile을 얻었다. 그림의 점선 가로축은 shutter를 open하고 close한 시간을 나타내고 세로축은 이론적인 flux로부터 계산한 농도이다. 이때 기판온도는 540°C였다. 계면은 대단히 abrupt한 경계면을 보여주고 있다. 이때 resolution은 Debye length

$$\lambda_b = \sqrt{\frac{bKT}{4\pi^2 e^2 \sum n_j Z_j^2}}$$

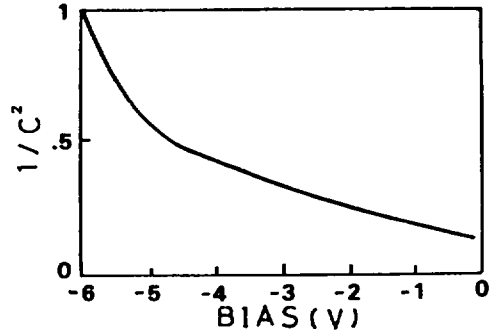


Fig. 7. $1/C^2$ vs reverse bias.

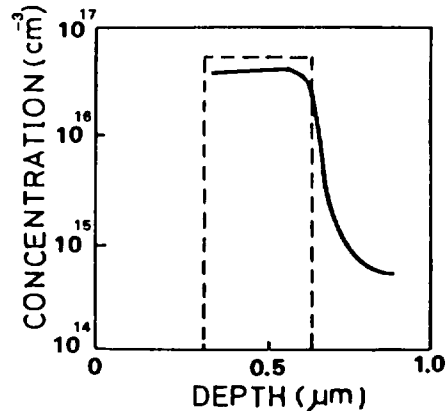


Fig. 8. Doping profile of Sn doped GaAs epilayer.

로부터 농도가 $10^{16} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 인 GaAs인 경우 430 ~ 136 Å 정도이다.

이 doping profile로부터 growth rate를 $0.34 \mu\text{m h}^{-1}$ 로 고정했을 때 Sn cell의 온도에 대한 doping 농도의 관계를 얻은 것이 Fig. 9이다. 이 그림에서 보는 바와같이 성장온도가 높을수록 계면의 완만한 곡선을 볼 수 있다. 이것은 Sn이 이 기판 표면에서 충분히 긴 absorption life time을 가지므로 성장층에 혼입되는 것보다 표면에 segregate되는 경향을 갖기 때문이다. (Wood and Joyee, 1978) 이때 surface segregation과 혼입과정은 성장중 기판온도가 높을수록 segregation이 증가하고 특히 560°C 이상에서는 현저하다.

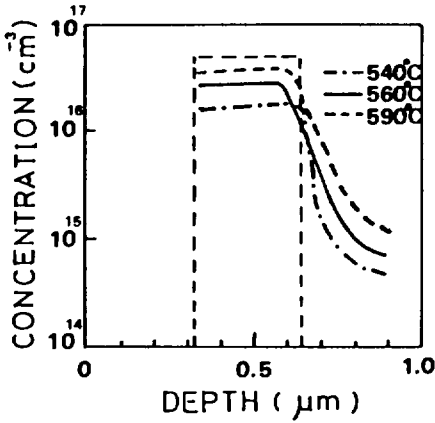


Fig. 9. Doping profile of GaAs epilayer grown at 540°C, 560°C and 590°C

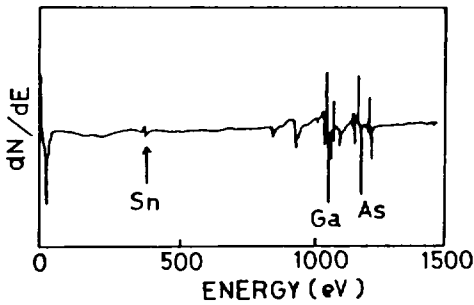


Fig. 10. AES spectra of Sn doped GaAs surface, $n=6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Sn농도가 $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 일때 표면의 AES spectra를 나타낸 것이 Fig. 10이다. 그림에서 Sn이 약 430eV에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 Ploog와 Fischer(1978)가 기판온도 500°C이상에서 $7 \times 10^{18} \leq n \leq 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 으로 doping한 박막 표면에서 AES로 Sn을 검지한 사실과 같다. 즉 Sn이 표면에 축적된다는 것을 의미한다. 왜냐하면 AES의 sensitivity는 일반적으로 $\approx 10^{-2}$ mono layer인데 반해 농도가 10^{18} cm^{-3} 일때는 10^{-5} monolayer에 해당하기 때문이다.

한편 Be cell의 온도를 700°C~940°C로 변화시켜 성장한 Be-GaAs시료에 대해 Hall effect를 측정하여 mobility, carrier concentration 등을

구하였다. Fig. 11은 Be cell의 온도에 따른 GaAs epi 층의 hole concentration의 변화를 보인 것이다. 이 그림에 나타난 바와 같이 hole concentration은 Be cell온도에 선형적임을 알 수 있다. 이것은 Be의 한 원자가 GaAs에서 하나의 자유 acceptor를 만든다는 것이고 가전자대 위에 shallow acceptor level (30meV)을 만든다는 것을 뜻한다.

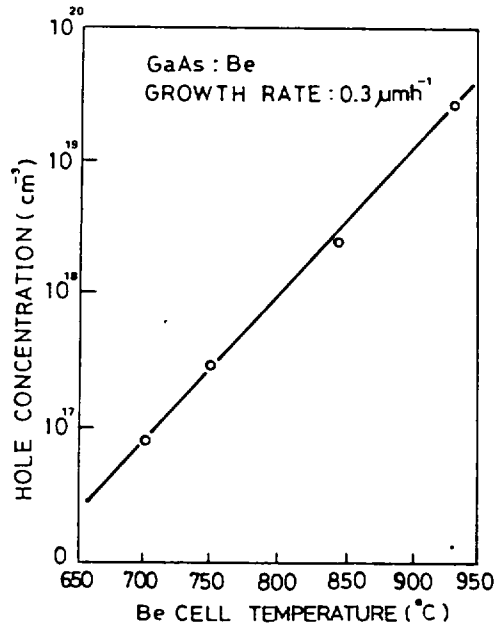


Fig. 11. Hole concentration dependence of the Be cell temperature at growth rate $0.4 \mu \text{ mh}^{-1}$.

Fig. 12는 Be-GaAs에 대한 온도변화에 따른 hole mobility의 변화를 나타낸 것이다. GaAs에서 mobility는 polar optical phonon 산란, acoustic phonon에 의한 piezoelectric 산란, 변형 potential에 의한 산란, 공간전하에 의한 산란 등을 받는다. 이를 산란 mechanism에 따른 Matthiessen의 방법에 따라 계산된 것이 실제의 Total이다. 그림에 나타나 있는 바와같이 Be doped GaAs epi층의 mobility는 77K-300K의 전 온도구간에서 이온화된 불순물의 산란이 지배적임을 알

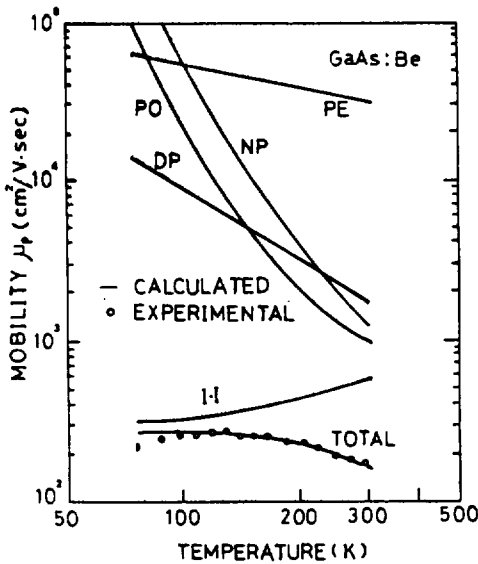


Fig. 12. The point(°) were obtained from Hall measurements. The solid curves show the contribution of deformation potential(DP), piezoelectric(PE), non polar optical(NP), polar optical(PO), and ionized impurity(I.I) scattering to the total mobility.

수 있다.

또한 GaAs에 Be을 $1.1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \sim 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 로 doping하여 Ge농도에 따라 hole mobility를 조사한 것이 Fig. 13이다. 그림에 나타낸 실선은

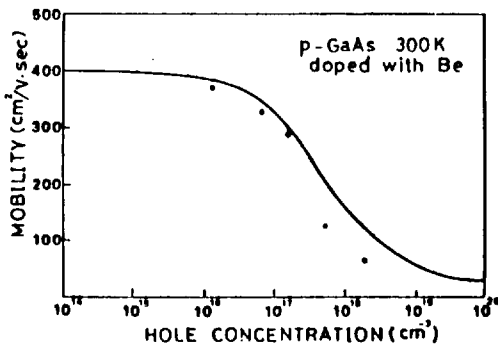


Fig. 13. Hall mobility as a function of hole concentration.

격자제한 mobility를 $400 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 로 가정하고 Brooks-Herring식을 이용하여 300K에서 hole 농도에 따른 mobility의 의존성을 간단히 계산한 Wiley (1975)의 결과를 나타낸 것이다. 그러므로 이 결과는 실제의 이론적 값이 아니고 단지 시료로부터 얻은 mobility의 실험결과에 대한 경향을 보고자 하는 것이다. Ploog는 MBE에 의해 성장된 undoped p-GaAs에 대해 Hall 효과를 조사한 결과 실험값이 이 실선에 대단히 일치하는 것을 보았고 Hegems도 Be doped GaAs층을 MBE로 성장하여 잘 일치한다는 것을 보였다. Hegems의 결과는 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 이하에서는 실선보다 낮은 mobility를 나타내고 그 이상의 doping level에서는 그보다 큰 값을 나타낸다고 보고하고 있으나 본 실험에서는 모두 낮게 나타나고 있다. 이것은 성장증 분위기 gas인 As_2 , O_2 , N_2 , 혹은 반응성 gas등에 의해 mobility에 영향을 준 결과로 생각된다.

摘 要

MBE에 의하여 GaAs기판에 GaAs epi층을 성장하면서 n형 dopant로 Sn, p형 dopant로 Be을 doping하여 그 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

Sn을 doping한 GaAs epilayer에서 mobility는 농도가 증가할수록 감소하고 10^{18}cm^{-3} 이하에서는 residual carbon의 영향으로 이론치에서 벗어나는 것을 알 수 있었으며 Sn cell온도와 Sn concentration은 $580^\circ\text{C} \sim 680^\circ\text{C}$ 범위에서 선형적인 관계를 나타내었다. 또한 성장기판의 온도가 높을수록 Sn은 segregation 효과가 현저히 나타남을 알 수 있다.

한편 Be을 doping한 GaAs epilayer의 hole 농도는 Be cell온도와 선형적으로 비례함을 알았고 Be농도가 클수록 mobility는 작아지며, 이것은 Hegems 등의 결과와 잘 일치하였다.

Be의 GaAs epilayer에서 mobility는 77K-300

K의 온도범위에서 이온화된 불순물 산란에 의해 지배적으로 영향을 받는다는 것을 알았으며, Be

은 MBE에서 가전자대로 부터 shallow level을 형성하는 좋은 P형 dopant임을 알았다.

參 考 文 獻

- Arthur, J.R. 1974. Surface stoichiometry and structure of GaAs. *Surf. Sci.*, 43: 449-461.
- Chang, L.L., Esaki L., Howard W.E., and Ludeke R 1973. The growth of a GaAs-GaAlAs superlattice. *J. Vac. Sci. Technol.*, 8: 11-16.
- Cho, A. Y. 1971a. Film deposition by molecular beam techniques, *J. Vac. Sci. Technol.*, 8: 931-938.
- Cho, A. Y. 1971b. Growth of periodic structures by the molecular beam method. *Appl. Phys. Lett.*, 19: 467-468.
- Cho, A. Y. and Hayashi I. 1971. p-n junction formation during molecular beam epitaxy of Ge-doped GaAs, *J. Appl. Phys.*, 42: 4, 422-4, 425.
- Cho, A. Y. and Reinhart, F. K. 1974. Interface and doping profile characteristic with molecular beam epitaxy of GaAs: GaAs voltage varactor, *J. Appl. Phys.*, 45: 1, 812-1, 817.
- Cho, A. Y. and Arthur, J.R 1975. Molecular beam epitaxy, *Progr. Solid. State. Chem.*, 10: 157-191.
- Ploog, K. and Fischer A. 1978. Surface segregation of Sn during MBE of n-type GaAs established by SIMS and AES. *J. Vac. Sci. Technol.*, 15: 255-259.
- Ploog, K. 1980. Molecular beam epitaxy of III-V compounds in crystals, p. 75 Springer Verlag
- Wiley, J. D. 1975. In semiconductors and semimetals vol. 10, p. 91 ed. Willardson and A. C Beer New York Academy
- Wood, C.E.C. and Joyee, B.A. 1978. Tin doping effects in GaAs films grown by molecular beam epitaxy. *J. Appl. Phys.*, 49: 4, 854-4, 861.