

Optical isotropic properties of 2 inch n-InP single crystals

Joo Seon Seok^{*,**}, Hakjun Lim^{***}, Jong Rak Park^{***}, Jun-Ho Lee^{****} and Heongkyu Ju^{*,**,*†}

^{*}Department of Physics and Semiconductor Science, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

^{**}Gachon Bionano Research Institute, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

^{***}MiCo HighTech Ltd., Icheon 21694, Korea

^{****}Laser&Opto-electronics Team, Korea Electronics Technology Institute, Seongnam 13509, Korea

(Received September 18, 2025)

(Revised October 10, 2025)

(Accepted October 27, 2025)

Abstract We investigated optical anisotropy and homogeneity of a n-doped InP single crystal wafer grown by Vertical Bridgeman method. As circularly polarized light at 1,060 nm wavelength was incident to the wafer surface, output light polarization was analyzed to see optical birefringence-induced change in polarization. We also scanned the position on the wafer to which light was incident to see position-dependent optical anisotropy of the wafer, i.e. inhomogeneity. The change of polarization was seen to be correlated to some extent with etch pit density of the wafer. The polarization-based optical analysis can also be applied to other kinds of single crystal wafers which have crystallographic symmetries for the sake of straightforward examination of crystal defects such as dislocations as a function of wafer position and homogeneity of optical anisotropy.

Key words InP, n-doping, 2-Inch wafer, Single crystal defect, Dislocation, Optical isotropy, Polarization change, ZincBlende structure, VB growth method

2인치 n-InP 결정의 광학적 등방성 특성 분석

석주선^{*,**}, 임학준^{***}, 박종락^{***}, 이준호^{****}, 주형규^{*,**,*†}

^{*}가천대학교 반도체 물리학과, 성남, 13120

^{**}가천대학교 가천바이오나노연구원, 성남, 13120

^{***}(주)미코 하이테크, 인천, 21694

^{****}한국전자기술연구원, 성남, 13509

(2025년 9월 18일 접수)

(2025년 10월 10일 심사완료)

(2025년 10월 27일 게재확정)

요약 본 연구에서는 수직 브리지먼(Vertical Bridgman) 방법으로 성장시킨 n형 InP 단결정 기판의 광학적 등방성을 조사하였다. 1,060 nm 파장의 원편광의 빛을 기판 표면에 입사시키고, 통과한 빛의 편광 상태를 분석하여 복굴절(birefringence)에 의해 유도되는 편광 변화를 측정하였으며, 편광 변화는 기판의 에치 피트 밀도(etch pit density)와 어느 정도의 상관관계를 보였다. 또한, 광소자 제작에 많이 사용되는 InP 기판의 중요한 성질 중 하나인 기판의 광학적 균일성을 조사하기 위하여 기판 상의 빛의 입사 위치에 따른 광학적 균일성을 분석하였다. 본 연구에서 제시한 광학적 분석법은 결정학적 대칭성을 갖는 다른 종류의 단결정 기판의 광학적 균일성 측정에 응용될 수 있으며 전위밀도의 간접적인 측정에 응용될 수 있을 것이다.

1. 서론

인화인듐(Indium Phosphide, InP)은 III-V족 화합물 반도체로, GaAs와 유사한 Zinc Blende 결정 구조를 가

진다. 이러한 단결정 물질은 규칙적인 고유의 원자 배열로 인해, 단결정의 방향에 따라서 빛이 투과할 때 발생하는 고유의 복굴절 특성(편광 변화 특성)을 나타낼 수 있다[1-4]. 이상적인 단결정 InP는 (100) 면에 수직으로 입사하는 빛에 대해서는, 결정의 대칭성으로 인해, 광학적으로 등방적인 특성을 보일 것으로 예상된다[3,5]. 그러나 결정 내에 결함이 존재할 경우, 이러한 등방성이

[†]Corresponding author
E-mail: batu@gachon.ac.kr

깨지고 결정을 투과하는 빛의 편광 상태에 변화가 생길 수 있다[6-9]. 본 연구에서는 이러한 광학적 이방성 (anisotropy)를 이용하여 성장된 n형 InP 결정의 품질을 평가할 수 있는 기술을 제안하고자 한다.

선행 연구에서는, 황(S)으로 n-도핑된 2인치 직경의 n형 InP 기판($K_d = 0.1$, 캐리어 농도 $0.8 - 1.5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$)을 수직 브리지먼(vertical Bridgman, VB) 법으로 성장시킨 후, 결정학적, 광학적, 전기적 특성을 분석한 바 있다 [10]. 광탄성효과(photoelastic effects)등 복굴절 및 편광 변화를 측정하여 이를 변형률(strain) 및 전위밀도(etch pit density; EPD) 등 단결정의 결함성질과 연관하여 분석한 결과가 보고되기도 하였다[11-14].

본 연구에서는 해당 기판에 원편광(circular polarization) 레이저를 투과시켜 결정을 지나면서 발생시킬 수 있는 편광 변화를 측정하여, 성장된 결정의 광학적 등방성/이방성을 조사하고, 특히 기판위의 위치의 함수로서 측정된 편광 변화의 특성과 해당 위치에서의 EPD와 비교함으로써 결정 결함과 편광변화 사이의 상호연관성을 고찰 하였으며, 기판의 위치에 따른 광학적 균일성을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1. 측정 시스템 구성 및 편광 변화 측정

Figure 1은 n-InP 결정 샘플을 지나는 빛의 편광 변화를 관찰할 수 있는 실험 셋업 조감도이다. 실험에 사용할 광원으로 근적외선 1,060 nm 파장을 갖는 연속파 레이저(LQC1060-90E, Newport)를 선택하였다. 이는 가시광선 파장의 경우 대부분의 빛을 n-InP 기판이 흡수하므로 투과하는 빛의 세기가 매우 약해서 편광변화 측정에 어려움이 있었기 때문이다. 레이저에서 나온 1,060 nm 파장의 빛을 선형편광기(linear polarizer, GL10-B, Thorlabs)를 이용하여 순수한 선형편광으로 만든 후, 사분파장판(quarter-wave plate, $\lambda/4$)(AQWP05M-980, Thorlabs)를 이용하여 원편광을 만들었다. 이후 원편광을 n-InP 결정 샘플에 입사시킨 후 샘플을 통과한 빛을 두번째 선형편광기(analyzer)(10LP-NIR, Newport)를 통과시켜서 투과한 빛의 파워를 측정하였다. 빛의 파워는 파워미터(PM100D, Thorlabs)로 측정하였다. 이때 analyzer를 360도 회전시켜서 투과된 빛의 파워의 변화를 측정하여 각도의 함수

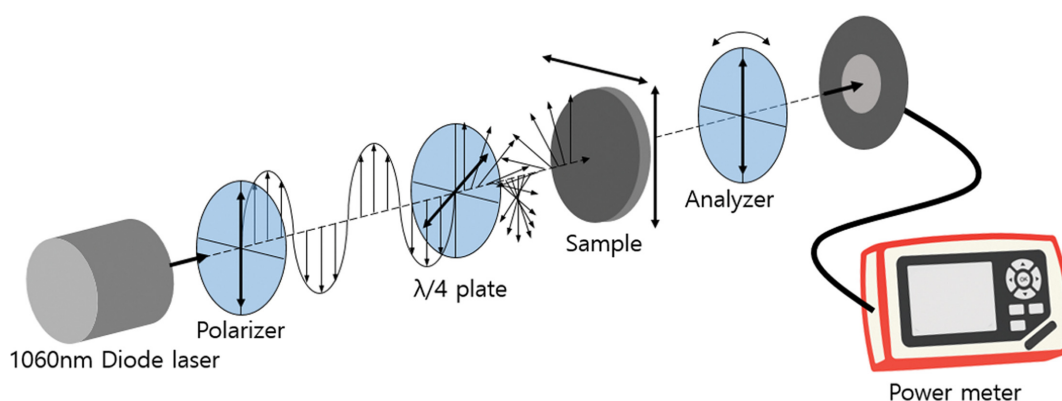


Fig. 1. Optical setup for measuring polarization change through a sample (wafer).

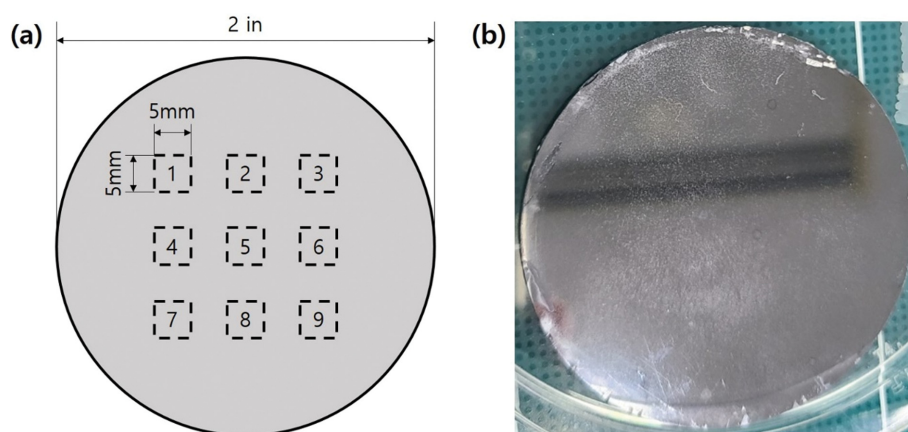


Fig. 2. (a) a n-type InP single crystal wafer. 1,060 nm laser was incident to each center of the nine squares to examine position-dependent optical isotropy of the wafer and (b) a photo of the wafer.

로서의 투과파의 세기를 측정하였다.

2.2. n-InP 단결정 샘플

사용된 샘플 시료는 선행 연구에서 VB 법으로 성장시켰으며, 황(S)을 도핑한 n-타입의 InP 단결정 기판이다 [10]. 기판의 두께는 1.6 mm이고 지름은 2 인치이다. 기판의 표면을 1 cm × 1 cm 크기의 9개 정사각형 영역 (3 × 3 행렬형식)으로 나누어서 각 정사각형의 중앙에 레이저를 입사시켜 상기에서 기술한 방식으로 편광변화를 측정하였다. Figure 2(a)는 해당하는 9개의 정사각형 영역을 보여주며, Fig. 2(b)는 실제 실험에 사용된 샘플 시료의 사진이다.

3. 편광 변화 측정 결과 및 분석

Figure 3(a)는 샘플 시료를 투과한 빛이 analyzer를 통과한 후 측정된 빛의 세기 결과를 analyzer 각도의 함수로 나타낸 것이다. n-InP 샘플을 제거한 후 선형편광 된 빛을 analyzer에 입사시켜 투과한 빛의 세기를 측정하고 analyzer의 각도를 회전시켜서 투과된 빛의 세기를 각도의 함수로 측정했을 경우(analyzer로 분석), 검은 점-라인(black dashed-line)과 같이 Mallus 법칙에 의해서 투과된 빛의 세기패턴이 나타난다. 이때 n-InP 샘플이 제거된 상태에서 입사파의 선형편광을 원편광으로 바꾸어서 analyzer로 분석하면 붉은 점-라인(red dashed-line)의 원형 패턴이 거의 그대로 재현된다.

이번에는, 입사파의 편광을 원편광으로 그대로 유지한 채 n-InP 기판 샘플을 $\lambda/4$ 와 analyzer 사이에 삽입했을 경우, 샘플을 투과한 빛을 analyzer의 각도의 함수로 측정하면 Figure 3(a)의 1-9 데이터에서 보이듯이 타원형태의 패턴을 얻을 수 있었다. 여기서 1-9번의 데이터는

n-InP 기판 표면의 9개의 서로 다른 위치에 입사시켰을 때 측정된 값이며, 조금씩 다른 이심률(eccentricity)를 가진 타원형태의 패턴을 보임을 알 수 있다. 타원의 찌그러진 정도를 정량화 하기 위해서 η 를 다음과 같이 정의하였다.

$$\eta = \frac{(P_{\max} - P_{\min})}{(P_{\max} + P_{\min})} \times 100 (\%). \quad (1)$$

여기서 P_{\max} 와 P_{\min} 는 analyzer를 회전하여 각도를 변화시켰을 때 측정된 analyzer output power 중 최대값과 최소값을 말한다. η 가 커질수록 타원의 찌그러진 정도가 심함을 말하며 제로(0)일 경우 원편광을 의미한다 ($0 < \eta < 100\%$).

Figure 3(b)에서는, 기판 표면의 입사 위치에 따라 얻은 η 값을 표시하였다. 0은 샘플을 제거했을 때의 경우이며, 원편광에 가까운 성질($\eta \sim 1\%$)을 보였다. 그러나 기판 샘플을 설치하고 기판 표면 위치를 달리해가며 측정했을 때 $\eta \sim 4 - 8\%$ 를 보였으며 특히 8번과 9번 위치의 경우 큰 η 를 보였다.

Figure 4(a)에서와 같이 zinblend 구조의 (100) 방향으로 원편광의 빛을 입사시킨다고 가정하자. 빛의 편광 주축(polarization principal axis)은 Fig. 4(b)의 2차원 평면에서 수직과 수평 축에 해당되며 두개의 축에 대해서 원자들의 위치가 대칭적이다. 결합이 없는 순수한 단결정 구조일 경우 이러한 결정학적 대칭성에 의해서 광학적 복굴절이 존재하지 않으므로 빛이 단결정을 통과하면서 편광변화 없이 입사파의 원편광이 그대로 유지되게 된다. 그러나 단결정 샘플에 전이(dislocation)와 같은 defect가 있을 경우 이는 대칭성의 부분적인 붕괴로 인해 복굴절을 야기할 수 있으며 결국 Fig. 3의 (a)와 (b)에서와 같이, 원형 패턴에서 벗어난 타원형 패턴의 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

특히 기판위의 위치에 따라서 η 값이 차이가 났으며, 이는 n-InP 기판의 광학적 등방성(optical isotropy)이 위

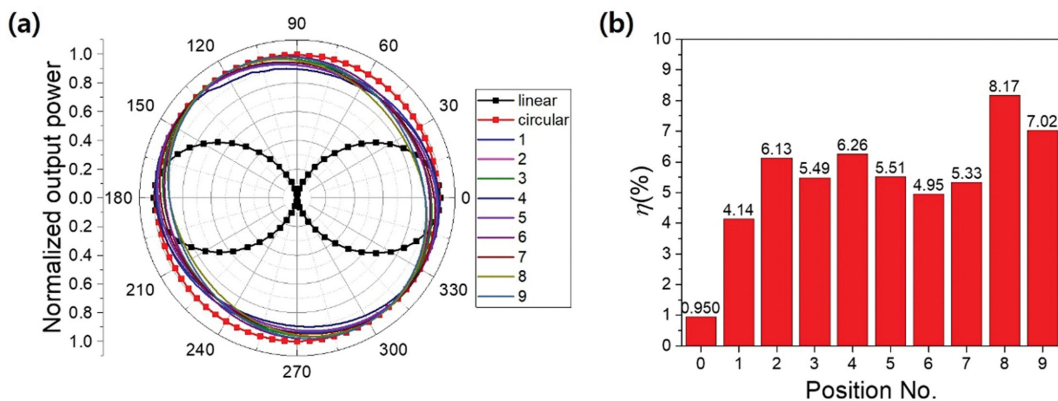


Fig. 3. (a) Optical output power through the analyzer as a function of its angle. They were normalized to the maximum power for a given wafer position. (b) η as a function of the wafer position. Position number zero ("0") denotes the case without the wafer (air).

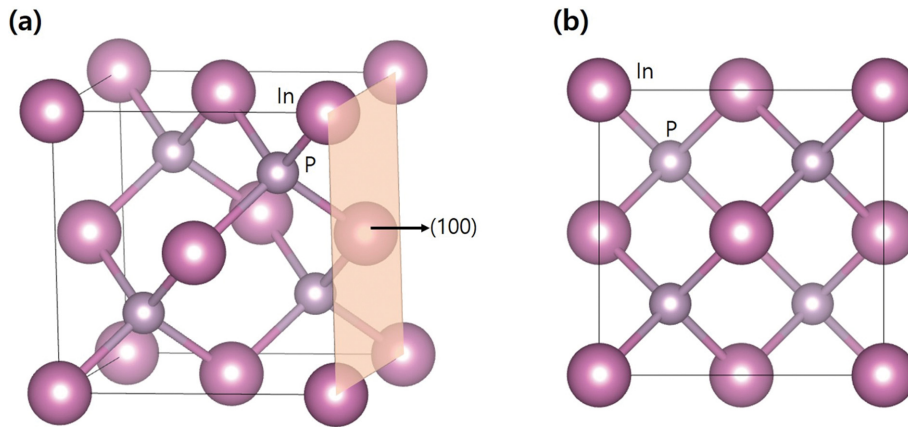


Fig. 4. (a) Zincblende structure of InP crystal (b) 2-dimensional view of InP crystal along (100) direction.

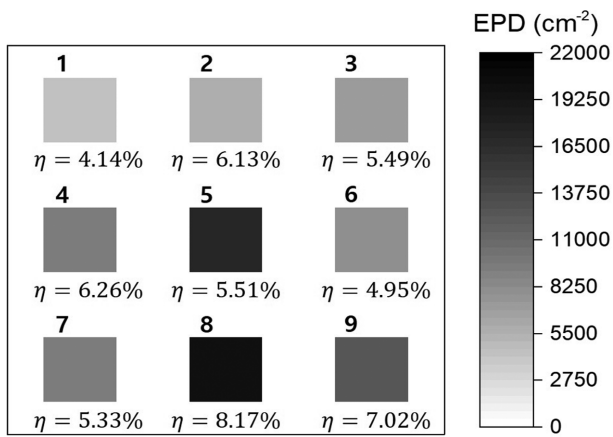


Fig. 5. Distribution of etch pit density (EPD) of nine local square areas (Fig. 2(a)) on the n-InP substrate and the η value obtained from the measured polarization change (standard deviation of η is 1.12 %).

치에 따라서 다소 균일하지 않음을 말해준다.

Figure 5는 n-InP 기판에 입사한 빛의 위치에 대응되는 9개의 5 mm × 5 mm 정사각형 영역에 해당하는 EPD 값을 그레이 스케일로 표시한 분포도와 각 η 값을 보여준다. 각 9개의 정사각형에 해당하는 EPD 값은 선행연구 [10]에서 얻은 5 mm × 5 mm 넓이의 69개 정사각형 셀을 바탕으로 산출하였다. 9개의 정사각형의 각 중앙 위치는 원편광 빛이 입사한 위치에 해당하며, 기판에 입사한 빛의 유효조사면적(effective area of illumination)은 약 3 mm × 3 mm이다. 9개의 η 값의 표준편차는 1.12 %이다.

9개의 정사각형 영역 중 위쪽의 3개 영역(1-3번)은 가장 아래쪽의 3개 영역(7-9번)보다 EPD 값이 작으며 이는 η 값도 더 작음을 알 수 있다. 즉 EPD와 η 가 어느 정도 상호연관이 있음을 알 수 있다. 이는 단결정 성장 과정에서 생성된 전위밀도 등의 결함으로 인해서 발생한 복굴절 현상(편광변화)으로 이해할 수 있다. 다만中间的 3개 영역(4-6번)를 1-3번 영역 또는 7-9번 영역과 비교

했을 때 이러한 상호 연관성(correlation)이 다소 떨어지는 것을 알 수 있다. 즉 편광변화가 EPD에 어느정도 상호연관은 있으나 단순히 비례하여 증가하지 않을 수 있음을 의미한다. 이는 EPD가 잔류 변형률(residual strain)에 반비례하는 반면, 편광변화는 잔류 변형률과 관련성은 있지만 단순히 선형적인 관계성을 가지고 있지 않기 때문이다[12]. 그럼에도 불구하고, 상기에서 얻은 η 값은 EPD에 대한 최소한 정성적인 정보를 내포하고 있으며, 특히 기판의 위치의 함수로서의 η 값의 표준편차는 기판의 위치에 따른 단결정성의 균일성에 대한 정보를 상대적으로 보여줄 수 있다. 실제로 무작위로 산재한 결점이 많은 기판의 경우 η 값의 표준편차가 증가할 것으로 예상할 수 있다.

마지막으로, 상기에서 기술한 편광변화 측정 실험에서 발생할 수 있는 오차 요인으로서 기판 표면의 거칠기(roughness)를 들 수 있다. 거친 표면에 의해서 빛이 산란하게 되는데, 이는 편광변화를 일으킬 수 있기 때문이다. 또한 빛의 유효조사면적이 정사각형 면적보다 작다는 사실도 EPD와의 직접적인 상호 연관성을 다소 떨어뜨리는 요인이 될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 n-InP 반도체 단결정 기판을 통과하는 광학적 편광변화를 측정하여 기판의 결함을 평가하는 방법을 제시하였으며, 특히 빛이 입사하는 기판 표면의 위치에 따른 편광변화를 측정하여 단결정 기판의 광학적인 등방성을 조사하였다. 빛이 입사하는 방향에 대해서 기판의 결정학적 대칭성이 존재하게 되면 복굴절 효과를 기대할 수 없지만 전위 등의 결함이 있을 경우 빛이 기판을 투과하면서 편광변화 등에 의해서 타원 편광으로 바뀌게 되며 이때 타원 편광을 특성을 측정하여 단결정

결함의 정도를 산출할 수 있었다.

상기에서 도출한 타원 편광의 찌그러진 정도는 단결정의 전위밀도와 어느정도 상호연관성이 있는 것으로 분석되며, 이런 광학적 측정방법은 다단계 화학적 처리과정과 데이터 분석과정을 요하는 전위밀도 측정법보다 매우 간단하게 단결정의 결함을 측정할 수 있는 장점을 제공한다. 특히 빛의 입사위치로서 기판 위의 다양한 포인트를 스캐닝하여 빠른 시간에 분석할 수 있으므로 단결정 기판의 광학적인 균일성을 매우 효과적으로 측정할 수 있는 가능성이 있다. 다만 거친 표면에 의한 빛의 산란 효과는 편광변화 측정 오차를 야기하므로 기판의 표면을 충분히 매끄럽게 해야 할 것이다.

상기에서 제안된, 기판의 광학적 균일성 분석 방법은 n-InP 단결정 기판뿐만 아니라 결정학적 대칭성을 갖는 단결정 기판에 적용되어 기판의 결함에 대한 간편하게 빠른 분석방법으로 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2021M3H4A3A02086939).

References

- [1] R. Resta and D. Vanderbilt, "Theory of polarization: A modern approach" in *Physics of Ferroelectrics*, K. M. Rabe, C. H. Ahn and J.-M. Triscone, Eds., *Topics in Applied Physics*, Vol. 105, (Springer, Berlin, Heidelberg, 2007) p. 31.
- [2] M.W. Allen, P. Miller, R.J. Reeves and S.M. Durbin, "Influence of spontaneous polarization on the electrical and optical properties of bulk, single crystal ZnO", *Appl. Phys. Lett.* 90 (2007) 062104.
- [3] M. Feneberg and K. Thonke, "Polarization fields of III-nitrides grown in different crystal orientations", *J. Phys.: Condens. Matter* 19 (2007) 403201.
- [4] T.M. H. Le, T. Ouisse and D. Chaussende, "Critical assessment of birefringence imaging of dislocations in 6H silicon carbide", *J. Cryst. Growth* 354 (2012) 202.
- [5] S. Harada and K. Murayama, "Advances in defect characterization techniques using polarized light observation in SiC wafers for power devices", *J. Cryst. Growth* 650 (2025) 127982.
- [6] T.Y. Lu, Q.R. Zhang and S.L. Zhuang, "Optical polarized properties related to the oxygen vacancy defect in the PbWO₄", *Chinese Phys.* 14 (2005) 1142.
- [7] J.F. Yin, Q. Bai and B. Zhang, "Subsurface damage detection on ground silicon wafers using polarized laser scattering", *J. Manuf. Sci. Eng.* 141 (2019) 101012.
- [8] C. Yang, F. Mess, K. Skenes, S. Melkote and S. Danyluk, "On the residual stress and fracture strength of crystalline silicon wafers", *Appl. Phys. Lett.* 102 (2013) 021909.
- [9] H.D. Geiler, M. Wagner, H. Karge, M. Paulsen and R. Schmolke, "Photoelastic stress evaluation and defect monitoring in 300-mm-wafer manufacturing", *Mater. Sci. Semicond. Process.* 5 (2002) 445.
- [10] J.S. Seok, G. Lee, H. Lim, K. Joo and H. Ju, "n-InP crystal growth for 2 inch wafers and their characterization", *JKCGCT* 34 (2024) 272.
- [11] J. Völkl and G. Müller, "Analysis of thermally induced stress in the LEC growth of InP crystals", *E-MRS Meeting 16 (Paris:Les Editions de Physique)* (1987) 141.
- [12] M. Yamada, M. Fukuzawa, Y. Yabuhara and M. Yokogawa, "Quantitative photoelastic characterization of residual strains in LEC-grown indium phosphide [100] wafers", *International Conference on Indium Phosphide and Related Materials 5 (Paris, France)* (1993) 69.
- [13] M. Yamada, "High-sensitivity computer-controlled infrared polariscope", *Rev. Sci. Instrum.* 64 (1993) 1815.
- [14] M. Fukuzawa and M. Yamada, "Fine structures of residual strain distribution in Fe-doped InP-(100) wafers grown by the LEC and VCZ methods", *J. Electron. Mater.* 25 (1996) 337.