



琉球大学学術リポジトリ

University of the Ryukyus Repository

Title	バイメタルモデルによる基板エピタキシャル層間格子定数差の測定
Author(s)	前濱, 剛廣; 宮里, 博明; 安富祖, 忠信
Citation	琉球大学工学部紀要(38): 11-20
Issue Date	1989-09
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/12449
Rights	

バイメタルモデルによる基板エピタキシャル層間 格子定数差の測定

前 濱 剛 廣* 宮 里 博 明** 安富祖 忠 信*

Measurements of the Lattice Constant Difference
between Epitaxial Layer and Substrate
by a New Bimetallic Structure Model

Takehiro MAEHAMA, Hiroaki MIYAZATO
and Chushin AFUSO

Abstract

A bimetallic model is proposed in measurement of very small difference rate of lattice constant $\Delta a/a$ between epitaxial layer and the substrate of the epitaxial layer/substrate structure. It is predicted theoretically that $\Delta a/a$ of the specimen can be measured up to the order of 10^{-7} by this method, if the epitaxial layer is thicker than $3 \mu\text{m}$.

The method is applied to non-doped GaAs epitaxial layer / Cr-doped GaAs substrate structure. $\Delta a/a$ of the specimen is 1.7×10^{-6} and the lattice constant of the non-doped GaAs is slightly larger than that of Cr-doped GaAs. The concentration of Cr (9.4ppm) obtained from this lattice constant difference does not agree with the doping concentration of Cr (0.1–0.5ppm) in the substrate. This suggests that some other lattice defects are contained in the specimen.

The method can not be applied to the specimen with the scratched surface, because such specimen warps abnormally with reducing the thickness.

Key Words : Epitaxial layer, Lattice constant, Warpage, X-ray double crystal method, Gallium arsenide

§1 はじめに

Ⅲ-V化合物のエピタキシャル結晶成長技術の発展は目覚ましく、ホモエピタキシーからヘテロエピタキシーへと技術開発が進み、超格子を用いた量子デバイスの研究開発が盛んに行われるようになって

いる¹⁾。ヘテロエピタキシーを用いた素子の特性には、ヘテロ接合界面の格子不整合が重要な影響を与えるので、結晶評価に関する研究も勢い、ヘテロ接合界面の格子歪みなどの測定に興味に移っているように思える²⁾。一方、ホモエピタキシーに於いては、基板とエピタキシャル層間の格子定数の差は、

受付：1989年5月15日、本研究の内容は第36回応用物理学関係連合講演会（1989年）で発表。

* 工学部電気工学科

Dep. of Electrical Engineering, Fac. of Eng.

** 工学部電子・情報工学科4年次学生

Under Graduate Student, Dep. of Electronics and Information Engineering

それらの不純物の種類や濃度差によるもので、一般にその格子定数差は小さく、結晶成長において特に問題はないかに見える。ところが、半導体 GaAs 基板の上に GaAs の活性層をエピタキシャル成長したホモエピタキシャル基板は、高速動作をする IC 基板として注目され、将来は集積密度が超 LSI レベルまで上がっていくものと考えられる。このような高集積状態になってくると、基板-エピタキシャル層間のわずかな格子定数の差であっても、IC の製造プロセスやその特性に重要な影響を与えるものと考えられる。それゆえ、ホモエピタキシャル基板の基板-エピタキシャル層間格子定数差も、できるだけ精密に測定しておく必要があろう。

一般に、エピタキシャル基板のような二重構造の各層間の格子定数の差は、エピタキシャル層の厚さや各層間の格子定数差がある程度大きいものであれば、X線二結晶法によるロックンクカーブのピーク分離角から測定することができる³⁾。以下、この方法をピーク分離法と呼ぶ。しかし、この方法には、エピタキシャル層が非常に薄くなるか、格子定数差が小さくなってくると、ロックンクカーブのピーク分離が不明確となることに起因する測定限界がある。例えば、GaAs のエピタキシャル基板に対して、CuK α_1 による (422) 回折を用いるとき、格子定数の差率 $\Delta a/a$ の測定限界は、 10^{-5} 程度である。

本論文の目的は、新しく提案したバイメタル法を用いると、エピタキシャル基板の $\Delta a/a$ の測定限界をロックンクカーブのピーク分離法に比べて 2 桁程度小さくすることができることを示すことである。

以下、§2 でピーク分離法の限界について説明し、§3 でバイメタル法を提案し、その原理を説明する。§4 では、GaAs エピタキシャル基板のバイメタル法による実際の測定方法とその測定結果を示し、§5 でそれらの結果の考察を行い、§6 にまとめを示す。

§2 ピーク分離法の限界⁴⁾

X線二結晶法の第2結晶(試料)として、Fig. 1 に示すようなエピタキシャル基板を考える。この第2結晶を回転してえられるロックンクカーブは、エピタキシャル層で回折されるX線によるロックンクカーブと基板から回折されるX線によるロックンクカーブが重なったものとして測定される。基板の格

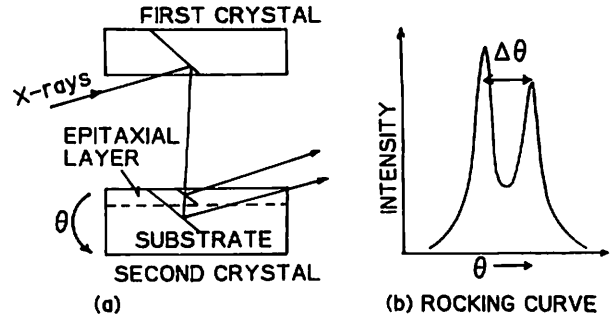


Fig. 1 Principle of the X-ray double crystal method to measure the lattice constant difference between epitaxial layer and the substrate from peak-separation of the rocking curve.

子定数を a とし、エピタキシャル層と基板の格子定数差を Δa とすると、エピタキシャル層及び基板のそれぞれのロックンクカーブの分離角は、

$$\Delta \theta = (\Delta a/a) \tan \theta_B \quad (1)$$

で表わされる。 θ_B はブラッグ角を表わす。(1)からわかるように、エピタキシャル基板から得られたロックンクカーブが明確なピーク分離を起こしていれば、これより $\Delta \theta$ を測定し、(1)式から、 $\Delta a/a$ つまりエピタキシャル層と基板間の格子定数の差率を決定することができる。

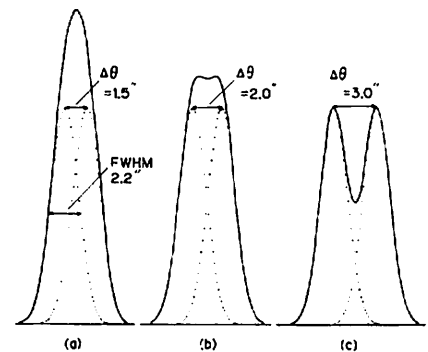


Fig. 2 Rocking curves of GaAs epitaxial layer / GaAs substrate structure calculated by superimposing two Gaussian distribution curves. Each of two Gaussian distribution curves expresses rocking curve of the epitaxial layer and that of the substrate, respectively. $\Delta \theta$ determined from $\Delta a/a$, which is difference rate of the lattice constant between the epitaxial layer and the substrate. (a) $\Delta a/a = 8.1 \times 10^{-6}$, (b) $\Delta a/a = 1.1 \times 10^{-5}$, (c) $\Delta a/a = 1.6 \times 10^{-5}$

このピーク分離法の測定限界を, 具体的な数値計算で説明する。第2結晶を GaAs エピタキシャル基板とし, 測定に用いる X線 を $\text{CuK}\alpha_1$ とする。回折面は (422) 面とし, エピタキシャル層及び基板から回折されるそれぞれの X線強度は等しいものとする。それぞれのロックンクカーブの強度分布はガウス分布関数であるとし, その分布の半値幅は, GaAs が完全結晶である場合の2.2秒を用いる。以上の仮定に基づいて Fig. 2 に $\Delta a/a$ が, (a) 8.6×10^{-6} , (b) 1.1×10^{-5} , (c) 1.6×10^{-5} のそれぞれの場合について計算したロックンクカーブの形を示した。

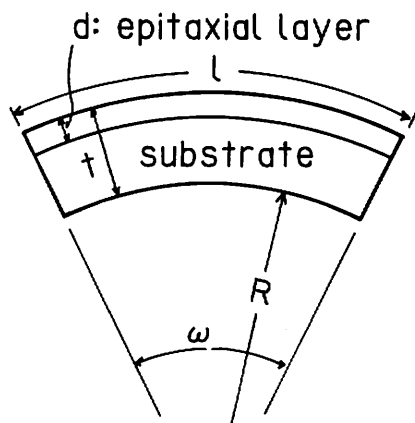


Fig. 3 Schematic illustration of the warpage of a bar of the epitaxial layer / substrate structure.

これから, $\Delta a/a$ が 1.1×10^{-5} 以下になると, 合成されたロックンクカーブのピーク分離が不明確となり, $\Delta \theta$ を測定することが不可能になることが分かる。実際の結晶には転位が存在したり, 不純物分布の不均一などがあるため, ロックンクカーブの半値幅は, 完全結晶の2.2秒より大きくなり, $\Delta a/a$ が 1.1×10^{-5} より大きい値で, ピーク分離が不明確になると考えられる。

このことから, ピーク分離法による GaAs エピタキシャル基板の格子定数差の測定限界は, $\Delta a/a$ が 10^{-5} 程度と考えるのが妥当であると思われる。

§3 バイメタル法の原理⁴⁾

Fig. 3 にエピタキシャル基板のそりの模式図を示してある。このエピタキシャル基板のそりは, 基板とエピタキシャル層の格子定数の違いによって生ずる。この基板のそりが円筒面状であるとすると,

その曲面の曲率半径 R は次式で表わされる。

$$R = (a / \Delta a) t^3 / (6d(t-d)) \quad (2)$$

ここで, a は基板の格子定数, Δa は基板とエピタキシャル層間の格子定数である。Fig. 3 では, 基板よりエピタキシャル層の格子定数が Δa だけ大きいと考えている。また, d はエピタキシャル層の厚さ, t はエピタキシャル基板全体の厚さを示す。(2)式は, バイメタルのそりの曲率半径を導出するときと同様な考え方で導出することができ, その導出については付録に示した。

基板のそり角 ω を, Fig. 3 に示すように定義するとそり角 ω は, 基板の長さ l と曲率半径 R の比であるから, (2)式より

$$\omega = l / R = 6(\Delta a/a)d(t-d) / t^3 \quad (3)$$

と表わせる。この式から, そり角 ω とエピタキシャル基板厚さ t との関係を測定すれば, 格子定数差率 $\Delta a/a$ を決定することができる。

式(3)に, 具体的な数値を代入して, そり角 ω と基板厚さ t との関係をエピタキシャル層厚さ d をパラメータにとって計算し, グラフにしたのが Fig. 4 である。この計算では, エピタキシャル層と基板の格子定数差率 $\Delta a/a$ を 10^{-6} とし, 基板の長さ l を 5mm としてある。

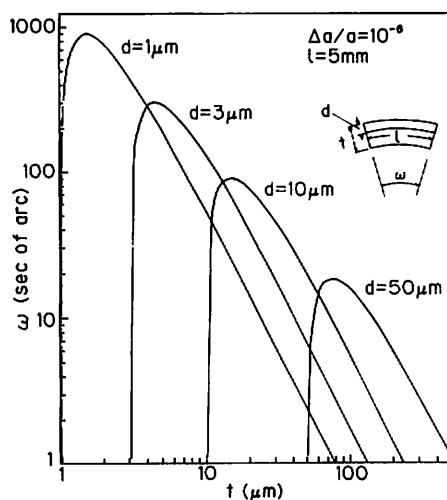


Fig. 4 Graphs showing the theoretical relation between the warpage angle ω of a bar of epitaxial layer / substrate structure and the bar thickness t , according to equation (3).

Fig. 4 から分かるように、各曲線は、 t の減少とともにそり角 ω が大きくなっていくが、 $t = 1.5d$ のとき最大となり、それ以後は t の減少とともに急激に ω も小さくなっている。 t の減少とともに ω が急激に減少する領域は、エピタキシャル層厚さに対して基板の厚さが薄くなったため、エピタキシャル層を圧縮する力が弱まり、そりが小さくなったことを意味する。

次に、この計算結果に基づいて、格子定数差率の測定限界について考える。§4 で説明するように、そり角 ω の測定は、X線二結晶法を用いて0.5秒程度まで可能である。一方、試料の厚さ t は、GaAs の場合非常にもろいので $50 \mu\text{m}$ 程度が試料を扱う限界と考えられる。この二つが、バイメタル法の測定限界を規定する主な要因である。Fig. 4 で、エピタキシャル層厚さ $d = 3 \mu\text{m}$ の曲線に着目する。 $t = 50 \mu\text{m}$ のとき ω は約8秒であるので、 t と ω の関係は、 $t = 50 \mu\text{m} \sim 150 \mu\text{m}$ の範囲で容易に測定できる。すなわち、エピタキシャル基板のエピタキシャル層厚さが $d = 3 \mu\text{m}$ の場合、格子定数の差率 $\Delta a/a = 10^{-6}$ 台は、問題なく測定できることを示している。格子定数の差率が一桁小さくなり、 $\Delta a/a = 10^{-7}$ になると、 ω の値も1/10になるので、 $t = 50 \mu\text{m}$ のときは約0.8秒となり、 t と ω の関係を測定できる限界となる。また、エピタキシャル層厚さ d が大きくなると ω も大きくなるので、エピタキシャル層厚さが $d = 3 \mu\text{m}$ 以上の厚さであれば、以上の考察から $\Delta a/a = 10^{-7}$ 台の測定は容易にできることになる。

曲率が同じでも、試料の長さ l が大きければそり角 ω は大きくなるので、格子定数の差率の測定限界を広げるために、 l を大きくすることも考えられる。しかし、試料の長さ l が大きすぎると、試料を薄くしていくときその厚さが均一にならず、試料のそりが円筒面状から大きく外れるため、(3)式が適用できなくなる。従って、試料長 l には適度な長さがあり、5 mm程度が扱いやすい長さと考えている。

§4 実験

4.1 実験方法

実験に用いた試料は、Cr-doped SI GaAs (100) 基板上に、GaAs のノンドーブ層 $2.7 \mu\text{m}$ 、Sドーブ層 $0.3 \mu\text{m}$ をクロライド法による気相成長法で積

んだエピタキシャル基板より、(110) 面へき開により切り出した。基板のエッチピット密度は $5.9 \sim 6.1 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$ で、Sドーブ層のキャリア密度は $2.8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ である。そりの測定は、同一エピタキシャル基板の異なる場所より切り出した二つの試料A、Bに対して行った。Fig. 5 に試料Aの形状と構造を示す。試料Bの形状と構造は、試料長 ($l = 4.23 \times 10^3 \mu\text{m}$) と試料幅 ($b = 1.21 \times 10^3 \mu\text{m}$) が少々異なる以外は、試料Aと同じである。

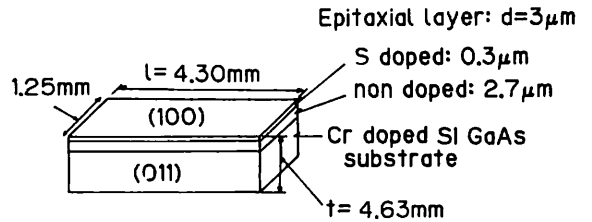


Fig. 5 The epitaxial layer / substrate structure of specimen A.

試料のそり角は、試料をエッチングでシンニングし、種々の試料厚さに対して測定した。試料のシンニングは、エピタキシャル層表面をピセインでテフロン板に接着すると同時に、試料の側面をもピセインでマスクし、基板の表面のみをエッチングすることにより行った。使用したエッチャントは、鏡面エッチング用エッチャント ($5\text{H}_2\text{SO}_4 + 1\text{H}_2\text{O}_2 + 1\text{H}_2\text{O}$) である。

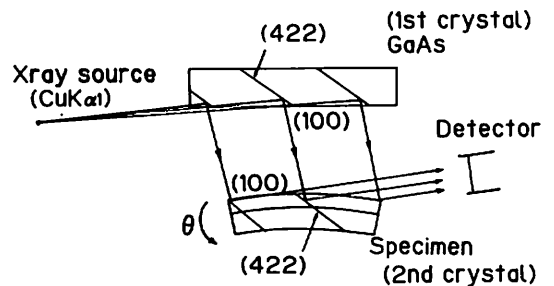


Fig. 6 Illustration of the measurement method of the rocking curves of the warping specimen with epitaxial layer / substrate structure.

試料の厚さの変化に対するそり角の変化は、X線二結晶法によるロッキングカーブの半値幅の変化として測定した。Fig. 6 にロッキングカーブの測定に用いた第一結晶と試料の配置図を示す。X線源は $\text{CuK}\alpha_1$ で、非対称平行配置、 $\{(422)^V, -(422)^R\}$ である。Fig. 6 に示してあるように、ロッキングカーブ測定の際、X線は試料のエピタキシャル層表面か

ら入射させ、試料(第二結晶)全面に一様に照射されるよう注意した。また、必要に応じて、試料のそりの方向を判定するため、 $(422)^V, -(422)^V$ 配置でエピタキシャル層表面のX線トポグラフを撮影した。

4. 2 実験結果

Fig. 7 は、試料Aの厚さに対するロッキングカーブの変化を示したものである。試料厚さ t の減少にともない、ロッキングカーブの半値幅が大きくなっていることが分かる。これは、試料が薄くなるに従い、試料のそりが大きくなっていることを示している。エピタキシャル基板から切り出したままの試料(以下、初期試料と呼ぶ)は、 $t=463\mu\text{m}$ と非常に厚いので、試料のそりはほとんど生じていないと考えられる。しかし、そのロッキングカーブ(Fig. 7 (a))の半値幅3.4秒は理論値の2.2秒より大きくなっている。この半値幅の広がり、試料のエッチピット密度(転位密度)が約 $6 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$ と大きいために生じたもので、 $3\mu\text{m}$ のエピタキシャル層の存在のために起こった、試料のそりによる広がりではない

と考える。従って、この初期試料のそり角 ω をゼロとすると、エッチングによって薄くした試料のそり角 ω は、その厚さのロッキングカーブの半値幅から初期試料の半値幅を差し引いた値と見なすことができる。Fig. 7 に示した各厚さに対するそり角 ω の値は以上の考え方に基づくものである。

Fig. 8 は、試料AとBのロッキングカーブの半値幅と上述した方法で求めたそり角 ω を試料厚さに対してプロットしたものである。その図で、 \circ と \triangle 印はそれぞれ試料A, Bの半値幅(FWHM)を、 \bullet と \blacktriangle 印は、それぞれ試料A, Bのそり角 ω を表わす。このそり角の測定値を、理論式(3)へ回帰させることにより、エピタキシャル基板の格子定数差率 $\Delta a/a$ は、 1.7×10^{-6} が得られた。Fig. 8 に実線で示した理論値は、回帰解析法で決定した $\Delta a/a = 1.7 \times 10^{-6}$ を(3)式に代入し、計算して示したものである。これより、 t に対するそり角の測定は、ほぼ(3)式にしたがっていることが示された。

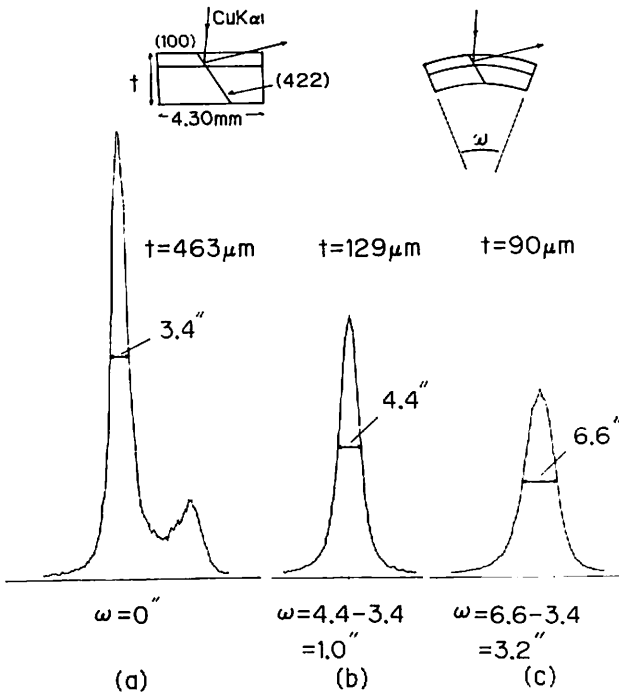


Fig. 7 The variation of the FWHM of the rocking curve of the specimen A with changing the specimen thickness t . The angle of warpage of each specimen is obtained from difference of FWHM between each specimen and the starting specimen ($t=463 \mu\text{m}$).

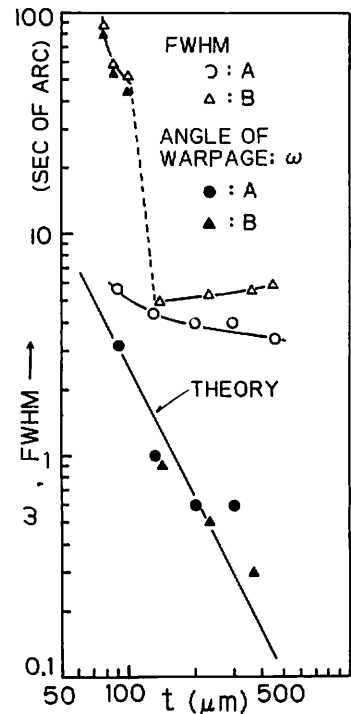


Fig. 8 FWHM and angle of warpage ω as functions of the thickness t . Symbols \circ and \triangle show FWHM of specimen A and B, respectively. Symbols \bullet and \blacktriangle show the angles of warpage of specimen A and B, respectively. The theoretical line is obtained from equation (3) for $\Delta a/a = 1.7 \times 10^{-6}$.

§5 考察

Fig. 8 に示された、試料 A に対する試料厚さ t と半値幅との関係は、 t が小さくなるとそり角が大きくなるので半値幅も広がるという考えと合致する結果となっている。しかし、試料 B に対する結果は、最初 t の減少にともない半値幅も減少してゆき、ある t 以下になると急に半値幅が増大する、一見理論と矛盾する変化を示している。この結果について以下で考察する。

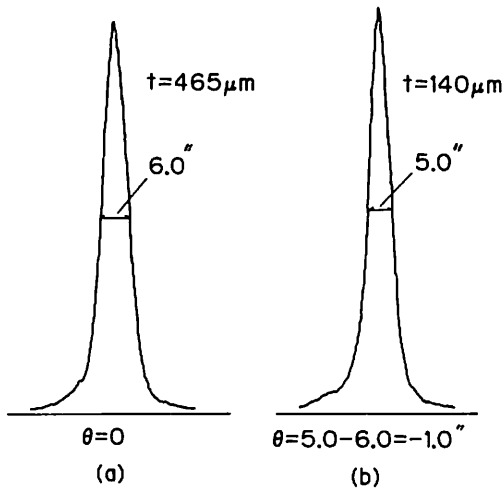


Fig. 9 Rocking curves for specimen B. (a) starting specimen $t = 465 \mu\text{m}$ and (b) $t = 140 \mu\text{m}$.

Fig. 9 に、試料 B の初期試料 $t = 465 \mu\text{m}$ と $t = 140 \mu\text{m}$ にしたときのロックンクカーブを示した。初期試料の半値幅は 6 秒とかなり大きく広がっており、これを転位密度 (約 $6 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$) だけの効果と考えるには無理がある。従って、この半値幅の広がりには、エピタキシャル層を形成する以前に、転位分布や不純物分布等の不均一により、基板そのものが少々そっていたため、エピタキシャル層形成後も、Fig. 10(a) に示すような、そりが残っていたためと考える。後述するが、ノンドープのエピタキシャル層は、Cr ドープの基板より平均して格子定数が大きいと考えるので、エピタキシャル層は基板より圧縮力を受けることになる。従って、Fig. 10(a) に示されたそりを小さくする方向の曲げモーメントが働いているので、その基板を薄くしていくと、試

料は Fig. 10(b) のように平らになり、そのため Fig. 9 (b) のように半値幅が減少することになる。更に基板を薄くすると、Fig. 10(c) に示すように試料は最初とは逆にそって行く。そのため、半値幅は、 t の減少とともに最初とは逆に増大して行くことになる。以上の解釈は、Fig. 8 に示した試料 B の t と半値幅の関係を示す傾向と定性的に一致する。

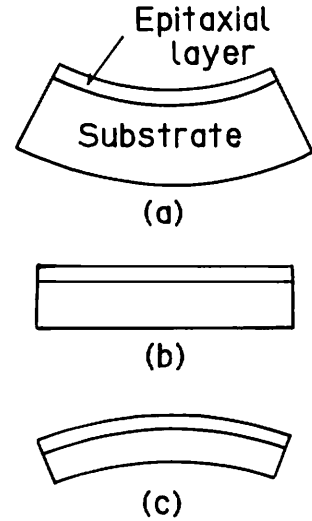


Fig. 10 Schematic illustration of the warpage variation of a specimen of epitaxial layer / substrate structure with reducing specimen thickness. (a) starting specimen, warped opposite direction. (b) flattened by reducing thickness and (c) warped by further reducing thickness.

試料 B に対する試料厚さ t とそり角 ω の関係は、上述したように初期試料がもともと反対側にそっていたため、初期試料の半値幅を基準とした各 t に対する半値幅の変化の絶対値をそり角 ω と見なして、Fig. 8 に▲印でプロットしてある。これは、 $t = 465 \sim 140 \mu\text{m}$ の範囲では理論曲線とほぼ一致している。ところが、 $t = 102 \mu\text{m}$ では半値幅が急に増大して、 ω の測定値は $\omega - t$ の理論曲線から大幅に逸脱している。この逸脱の原因は、Fig. 11 に示したロックンクカーブの形状からある程度推測できる。Fig. 11 のいずれのロックンクカーブにも三つのピークがみられる。このことから、試料のそりが均一な円筒面状でなく、Fig. 12 に示すような、 α 、 β 、 r の三つの領域に分かれるようなそりが起こってい

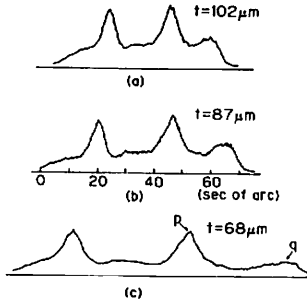


Fig. 11 Rocking curve variation of specimen B with reducing the specimen thickness under abnormal warpage occurrence.

ると考えることができる。このようなその原因としては、Fig. 12に示してあるように、試料厚さに不均一が生じたこと、あるいは試料表面に傷がついたことが考えられる。更に、Fig. 11のロッキングカーブの三つのピークが明確に分離していること、試料厚さが薄くなるにつれてピークはそれほどブロードにならず、ピークの分離角が増大すること等を考慮すると、このその異常は、試料表面の傷が主な原因であると推測される。

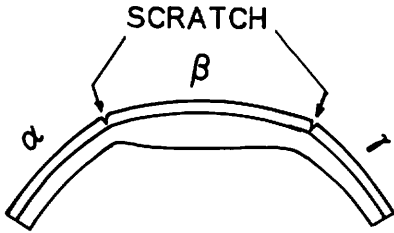


Fig. 12 Schematic illustration of the abnormal warpage due to either scratching the surface of specimen or ununiformity of the thickness.

以上の推測を確かなものとするために、試料Bの初期状態 ($t = 465 \mu\text{m}$) と異常なそりが起こった状態 ($t = 68 \mu\text{m}$) のときの、それぞれのエピタキシャル層表面のX線トポグラフを比較した。Photo 1(a)が初期試料のX線トポグラフで、試料表面に特別な傷がないことを示している。Photo 1(b), (c)は $t = 68 \mu\text{m}$ のときのトポグラフで、それぞれFig. 11(c)のロッキングカーブのp及びq点に回折条件を固定して撮影したものである。Photo 1(b)より、コントラストが明確に3領域に分離していることが分かる。そのコントラストの境界には、Photo 1(a)では観測されなかった傷が発生していることが認められる。このことから、 $t = 102 \mu\text{m}$ 以下で起こった異常なそりの

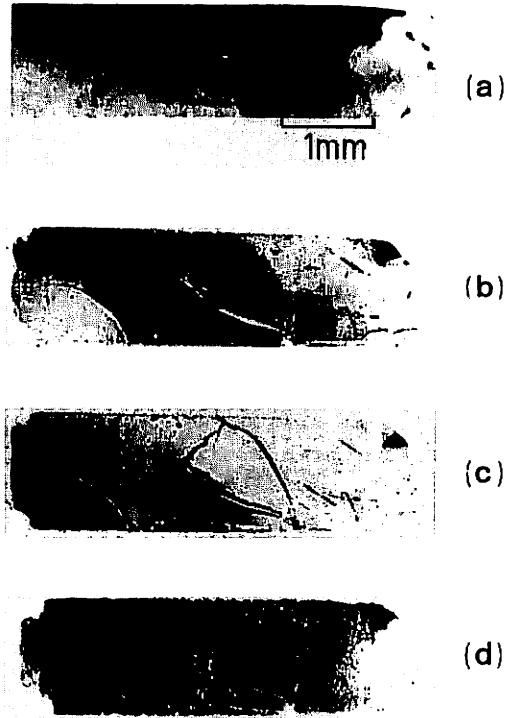


Photo. 1 x-ray topographs of specimen B taken with (422) reflecting plane. (a) starting specimen $t = 465 \mu\text{m}$. (b) and (c); $t = 68 \mu\text{m}$, the each topograph taken at the peak p and q in the rocking curve in Fig. 11(c), respectively. (d) the specimen after the epitaxial layer has been removed.

原因が、試料を薄片化する過程でつけられた表面の傷であったことが確認された。従って、試料表面につけられた少々傷でも、バイメタルモデルの理論値から大幅なずれを生ずるので、バイメタル法の適用にあたっては、試料表面に傷をつけないよう十分注意する必要がある。

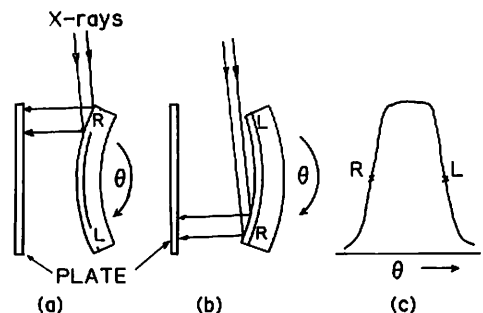


Fig. 13 Judgement method of the warpage direction by the x-ray topographs and the rocking curve. (a) convex specimen. (b) concave specimen. (c) rocking curve for (a) and (b).

次に、その方向について考察する。Fig. 13は、観測面が凸のそのの場合と凹のそのの場合のX線トポグラフの違いについて説明した図である。Fig. 13(a), (b)いずれの場合も、試料を θ 方向に回転して測定したロックンクカーブの形は、各試料の曲率が同じであれば、その半値幅はほぼ同じで、Fig. 13(c)のように広がっている。しかし、(a)の場合、X線の入射側に近い場所Rから回折が始まり、 θ 方向回転とともにL側へ回折箇所が移動していく。一方、(b)の場合は逆に、X線の入射側と反対の箇所Rから回折が始まり、 θ 方向の回転とともにL側へ回折箇所が移動していく。このため、(c)のロックンクカーブのR点に回折条件がくるように(a), (b)の試料をセットしてトポグラフを撮ると、これらのトポグラフのコントラストは左右逆になる。従って、X線トポグラフ撮影の回折条件とトポグラフのコントラストから試料のその方向を判定することができる。以上のことを考慮して、試料Bの異常なそのの起こっている $t=68\mu\text{m}$ のときのその方向を判定した。Photo 1 (c)は、Fig. 11(c)のロックンクカーブのq点に回折条件がくるように試料Bをセットし、エピタキシャル層表面を撮影したものである。この写真のコントラストより、エピタキシャル層表面側が凸となるようにそっていると判定された。このことから、Crドーブ GaAs 基板よりもノンドーブ GaAs エピタキシャル層が平均して格子定数が大きくなっていると結論できる。これは、Crの共有結合半径(1.17 Å)がGa, Asの共有結合半径(1.225 Å)に比較して小さいことと定性的に一致する。

いま仮に、GaAs 基板にドーブされているCrが、すべてGa位置あるいはAs位置と置換され、しかもエピタキシャル層はまったく不純物がないと仮定する。上述したバイメタル法から求められた $\Delta a/a = 1.17\text{ \AA}$ および 1.225 \AA をベガード則⁶⁾に代入するとCrのドーブ量が9.4PM(重量比)と得られた。この値は、基板メーカーの表示値0.1~0.5PMに比較して1桁以上大きな値となっている。この相違は、ここでの計算が、基板にドーブされたCrだけが格子定数の差 $\Delta a/a$ に寄与しているとは仮定したことと起因すると思われる。従って、このことは、意識的にコントロールして添加された不純物であるCr以外に、基板エピタキシャル層間の格子定数差を引き起こす原因が存在することを示唆するものである。この主な原因として、異なる結晶成長法で成長され

た基板 GaAs とエピタキシャル GaAs における非化学量論的組成の程度の違いによる格子定数差等が考えられる。

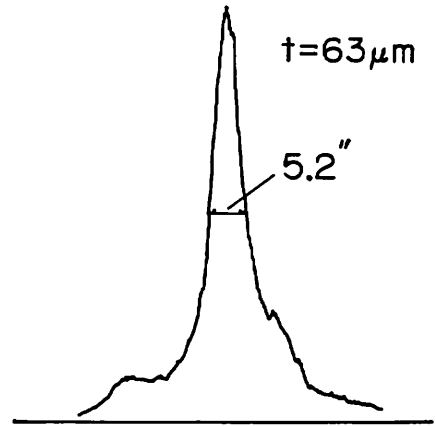


Fig. 14 Rocking curve of the specimen B (initial thickness $t = 68\mu\text{m}$) after the epitaxial layer has been removed.

次に、表面の傷による試料B ($t = 68\mu\text{m}$) の異常なそりに、塑性的な変形も含まれていないか検討するため、その試料のエピタキシャル層を完全に除去した後、X線トポグラフの撮影と、ロックンクカーブの測定を行った。これらをPhoto 1 (d)およびFig. 14に示した。Photo 1 (d)から、エピタキシャル層が除去された後も表面の傷の痕跡があること、トポグラフのコントラストは、その痕跡に関係なく一様になっていることが分かる。またFig. 14のロックンクカーブの半値幅も、異常なそりが起こる前の半値幅5秒にほとんど戻っていることを示している。以上のことは、エピタキシャル層を除去することによって、基板のそりが完全になくなったことを示すものである。従って、表面の傷により異常なそりが生じたが、塑性的な変形は起こっていなかったと結論できる。

§6 まとめ

エピタキシャル基板のエピタキシャル層・基板間格子定数差率の測定限度を広げるため、バイメタル法を採用して検討し、具体的にGaAs エピタキシャル基板に適用して下記の結論を得た。

- (1) バイメタルモデルによるエピタキシャル基板のそり角 ω とその厚さ t との関係を表わす理論

式より、エピタキシャル層の厚さが3 μ m以上あれば、エピタキシャル層・基板間の格子定数差率の測定が10⁻⁷まで可能であることを示した。

- (2) バイメタル法をGaAs基板に実際に適用し、その格子定数差率を測定したところ、1.7 \times 10⁻⁶を得た。この値は、X線二結晶法のロッキングカーブのピーク分離法では測定不可能な値である。
- (3) 試料を薄くすることによってそった、GaAsエピタキシャル基板のそりの方向をX線トポグラフより判定し、CrドープGaAs基板よりもノンドープGaAsエピタキシャル層の格子定数が大きくなっていることを示した。
- (4) この格子定数の差は、基板にドープされているCr不純物の濃度だけでは説明されず、基板GaAsとエピタキシャル層GaAsの結晶成長法の違いによる格子欠陥密度の差が、この格子定数差に影響を与えているのではないかと推論した。
- (5) バイメタル法においては、試料表面の傷が試料のそりに大きな影響を与え、格子定数差率の測定を不可能にする場合がある。従って、バイメタル法による測定に際しては、試料表面に傷をつけないよう注意する必要がある。

参考文献

- 1) 日本物理学会編：半導体超格子の物理と応用 (培風館) 1984
- 2) Special issue: Highly Lattice Mismatched Heteroepitaxy, HM²: 日本結晶成長学会誌13 No 4 (1986)
- 3) 岸野正剛:半導体研究 12 (1976) P.315
- 4) 前濱剛廣, 宮里博明, 安富忠信:第36回応物学会講演予稿集 (1989) P.319
- 5) 中島真人, 石田宏一:応用物理 56 (1987) P.623

付録 本文(3)式の導出

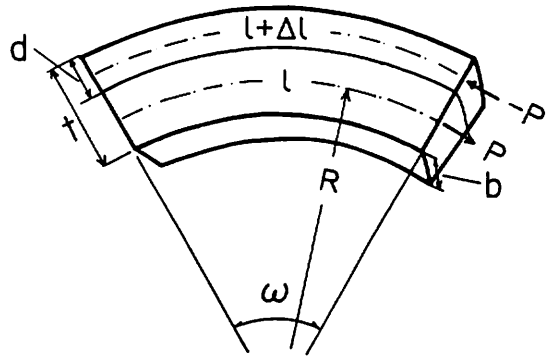


Fig.A-1 Schematic illustration of the warpage of a bar of epitaxial layer / substrate structure.

Fig. A-1 に示したようなエピタキシャル基板のそりについて考える。エピタキシャル層は基板の格子定数 a より Δa だけ格子定数が大きいものとする。エピタキシャル層と基板との境界では格子定数が整合しなければならぬため、エピタキシャル層は基板から圧縮力 P を受け、逆に基板はエピタキシャル層から引っ張り力 P を受ける。その力により、エピタキシャル基板の厚さを t とすると、

$$Pl/2 \dots\dots\dots (A-1)$$

の曲げモーメントを生じ、Fig.A-1 のようなそりが起こる。一方、そのそりに抗して、エピタキシャル層および基板のそれぞれに、フックの法則に従った逆のモーメント

$$El_E/R, El_S/R \dots\dots\dots (A-2)$$

が発生する。ここで、 l_E, l_S はエピタキシャル層および基板の二次断面モーメント、E はヤング率、R はそりの曲率半径である。従って、曲げモーメント $Pl/2$ と逆のモーメントの合成 $El_E/R + El_S/R$ が平衡して、そのそりが決定される。すなわち、円筒面状のそりを仮定すると、その平衡式は

$$Pl/2 = El_E/R + El_S/R \dots\dots\dots (A-3)$$

である。なお、 l_E, l_S はそれぞれ、エピタキシャル層の厚さを d とし、エピタキシャル基板の幅を b とすると、

$$l_E = bd^3/12, l_S = b(t-d)^3/12 \dots\dots\dots (A-4)$$

と表わされる。また、エピタキシャル層と基板との境界においては、それぞれの格子定数は伸縮により整合しているのであるから、次式が成立する。

$$(l + \Delta l)(1 - P/Ebd - d/2R) \\ = l \{1 + P/Eb(t-b) + (t-d)/2R\}$$

..... (A-5)

ここで、 l および $(l + \Delta l)$ は、それぞれ基板およびエピタキシャル層が単独に存在するときの長さ、すなわち中性面の長さである。式 (A-5) の左辺の P/Ebd はエピタキシャル層の圧縮力による縮み率、 $d/2R$ はそりによる縮み率で、また右辺の $P/Eb(t-d)$ は基板の引っ張り力による伸び率、 $(t-d)/2R$ はそりによる基板の伸び率を表わしている。 $\Delta l/l$ およびそれぞれの伸縮率は、1 に比べて非常に小さいので、式 (A-5) は次のように近似できる。

$$(\Delta l/l - p/Ebd - d/2R) = P/Eb(t-d) + (t-d)/2R \dots\dots\dots (A-6)$$

式 (A-3)、(A-6) より P を消去し、式 (A-4) の関係を代入すると

$$1/R = 6(\Delta l/l)(t-d)d/t^3 \dots\dots\dots (A-7)$$

となり、 $\omega = 1/R$ と $\Delta a/a = \Delta l/l$ の関係より

$$\omega = 6(\Delta a/a)(t-d)d/t^3 \dots\dots\dots (A-8)$$

を得る。