DACの半導体の光学測定への応用

Application of DAC to Optical Studies of Semiconductors

小林 利彦

Toshihiko KOBAYASHI

In this article, a diamond anvil cell system for optical studies at variable pressure and at low temperatures is described. A remotely controlled pneumatic driver unit, which consists of a pair of coaxial bellows, operates with helium gas. The setup and techniques for photoreflectance (PR) and time-resolved photoluminescence (TRPL) measurements with a diamond anvil cell are presented. Examples of the application to PR and TRPL in III-V semiconductor alloys under high pressure are shown.

[DAC, photoreflectance, time-resolved photoluminescence, III-V semiconductor alloys, lifetime, spatially indirect recombination, heterointerface]

1. はじめに

物質に及ぼす圧力効果は基本的に原子間距離を縮小することである。これは半導体のバンド構造、電子状態に影響を与える。その光学的特性、電気的特性など物性を圧力の観点から調べることはこれまで多くの研究者によりなされてきた。それらの特徴は種々の物性の圧力効果そのものを知りたいということはもちろんであるが、常圧下のみの実験だけでは得られない新たな情報が引き出される可能性も有することである。

本稿ではダイヤモンドアンビル高圧セル (DAC) の半導体への応用として高圧力下の半導体の光学的特性の測定技術とそれらの具体的な測定例を紹介する。まず 1) 遠隔操作で圧力を変化させるヘリウムガス圧駆動方式 DAC およびそれに関連した技術である 2) アルゴンガスを圧力媒体として液化・封入する方法を述べる。次にこの DAC と組み合わせた光学測定技術として、3) 変調分光法のひとつである光変調反射 (フォトリフレクタンス: PR) 測定系と III-V 族三元混晶半導体 GaAsP についての測定例を、また 4) 時間分解分光法 (TRS) のひとつである時間分解フォトルミネッセンス (TRPL) 測定系と GaAs/GaN 量子井戸構造についての測定例を述べる。

これら高圧力下における PR 測定、TRPL 測定は、光吸収測定、フォトルミネッセンス測定あるいはラマン散乱測定などと比較すれば、現在でもまだそれほどポピュラーな測定ではない。

2. ヘリウムガス圧駆動方式 DAC

ダイヤモンドアンビル高圧セル (DAC) は種々の光学的特性の測定に適しており、これまでに様々なデザインのものが使用されてきた。

小型で操作が簡単とされる DAC も低温下で圧力を変化させる光学実験に用いるとなれば、室温におけるほど容易ではない。アンビルの加圧方法が必ず問題となる。低温下の光学実験でクライオスタットなど冷却装置の外からこの加圧する力を得るには、例えば上部フランジから長い棒の中に入れてネジを回転させる、くさびを動かしてその力をテコに伝える、ワイヤーを引っ張るなどの機械的な方式[1-3]、あるいはベローズを組み込んだガス圧駆動の方式[4-6]など、数多くの例がある。本稿ではその中心部分に光を通すことのできる共軸二重ベローズ構造を組み込んだヘリウムガス圧駆動方式の DAC[7,8]について述べる。

DAC は基本的にはセル本体とピストンを組み合わせた

Bassett 形式のもので、その材質はベリリウム銅である。室温での加圧時にはセル本体を万力のような治具で挟んでおき、ピストン下部にはめたグランドナットを円盤状治具で回転させて加圧する力を得る。この加圧方式をガス圧でベローズを膨らませる方式に置き換えると

- 1) DAC をクライオスタットから取り出すことなく、試料温度を低温に保ったまま遠隔操作で圧力を連続的に変化できる
- 2) アンビルの中心部分へ水平方向の光学軸が確保できる
- 3) 圧力媒体としてアルゴンなどの液化・封入が行える

などの利点がある。

Fig. 1 は DAC ($60 \times 60 \times 72 \text{ mm}^3$) の断面図を示す。共軸二重ベローズ構造はサイズの異なる 2 個の nested-type ステンレス溶接ベローズを中心軸を一致させて組み合わせ、その両端には中心部分に光を通すことができるように穴の開いた円板を溶接したドーナツ状のものである。そのサイズは外径 40 mm、内径 10 mm で全長 20 mm である。先端径が 0.6 mm のアンビルを用いると面積比、すなわち圧力の増倍率はおおよそ 4000 倍となる。ヘリウムガス圧を 80 kg/cm^2 までかける時、このアンビ

Fig. 1. Cross-sectional drawing of the diamond-anvil high-pressure cell [7]. The principal components numbered are (1) diamond anvils, (2) fixed anvil mounting plate, (3) moving anvil mounting plate, (4) tilting screw (three used), (5) fixing screw (three used), (6) fixed grand nut, (7) translating screw (four used), (8) key, (9) view port (four places), (10) cell body, (11) piston, (12) needle bearing, (13) bellows assembly, (14) retaining grand nut, (15) capillary, and (16) support plate and tube.

ル先端ではおおよそ 30 GPa の圧力が発生することになる。ただし、ベローズ自体のバネ定数、ガスケットや圧力媒体の初期圧縮に要する力は考慮されていない。

この共軸二重ベローズ構造にはヘリウムガス導入用のステンレス細管（外径 1 mm、内径 0.5 mm）をハンダ付けし、クライオスタットの上部フランジを貫通して外部に取り出す。この細管は外径 3 mm、内径 1 mm のステンレス管に変換したのち、ガス圧力計、圧力調節用バルブ等を組み合わせた系統を経てヘリウムガスポンペに接続される。ポンペには必ず調整器を取り付けなければならないが、通常の調整器は二次圧力計が $15 \sim 25 \text{ kg/cm}^2$ であるので使用できない。ヘリウムガス用で二次圧力計が 100 kg/cm^2 ぐらいの調整器が必要である。実際のガス圧をより精密に測定し、必要な値に設定するためにはダイヤル径が 20 cm 以上の大型圧力計を接続することが望ましい。なお高圧ガスを扱うので法規への対応に注意したい。研究グループ、所属機関の形態にもよるが、例えば大学の低温センターへのご相談をお勧めする。

本装置では DAC を各圧力毎にクライオスタットから取り外す手順が無いので、光軸の再調整などは原則的に行わないで済む。従って得られた光信号強度を比較した議論が行える。発生圧力は、ガス圧を読み取ることにより細かく設定でき、慣れてくると希望する値にかなり正確に近づけることができる。手でグランドナットを捻って加圧する方式と比較して、不用意に大きな力で加圧することが避けられるので、安全な DAC 操作が期待できる。当然のことながら、室温における光学実験にも便利に使用できる。しかし液体ヘリウム温度ではガス圧駆動としての実験は困難である。

3. アルゴンガスの液化・封入

半導体の光学的特性の測定では試料室内に発生する圧力は多くの場合、等方的であることが望ましい。そこで圧力媒体として柔らかく、また不活性なガスであるヘリウム、アルゴン等が適している。それら圧力媒体の封入にはこれまでにいくつかの方法が考案、改良されてきた。使用する DAC の形状や駆動方式、あるいは実験目的に応じて使い分けがなされている[9-12]。

Fig. 2 は前述のヘリウムガス圧駆動方式 DAC により圧力媒体としてアルゴンガスを液化・封入するための中心部分を示す[12]。これは Liebenberg の方法[9]をもとに少し改良したものである。アンビル、ガスケットを取り囲むように金属製リング（外径 19.4 mm、内径 19

Fig. 2. The minichamber built around the diamond anvils for loading condensable argon gas.

mm) を下部アンビル台座に配置する。その壁を貫通して細管(外径 1 mm, 内径 0.5 mm) を 2 本取り付け、アルゴンガスの入口、出口とする。またガスケットとアンビル先端の温度を常時モニターするために熱電対も取り付ける。金属製リングと上部アンビル台座の隙間を塞ぐためにリング状に成形したインジウム線(直径 2 mm) を載せておく。これをわずかな力で押しつぶすことによってリング内はほぼ密閉した小さな空間となる。そして DAC 内ピストン後部にベローズ構造を挿入し、グラッドナットで軽く締め付けて固定する。このときガスケットの上部とアンビル先端との間隔は例えば 50 μm 程度開けた状態になるよう調整してセットする。

実際にアルゴンガスを導入する前に DAC 全体は液体窒素温度(77 K) 近傍まで冷却しておく。大気圧下のアルゴンの沸点は 87 K、融点は 84 K で、液体であるための温度範囲は非常に狭い。熱電対によりガスケット近傍の温度を監視、制御しながらアルゴンガスを流す。小さな空間内で液化が開始されると、例えば 50 ml/min の流量が 45 ml/min に低下するなどの微妙な変化が現れる。それを確認した後、ベローズ構造にヘリウムガスを送り込んでわずかに加圧すると、ガスケットにアルゴンが封入される。念のためルビー蛍光法による圧力測定を直ちに行ってアルゴン封入を確認した後、実際の光学実験に移ることになる。

Fig. 3 はアンビルを駆動するためのヘリウムガス圧と試料室に発生した圧力との関係を示す。測定温度は 77 K である。ガスケットに開けた孔(試料室)の上部とアンビル先端との間隔を広くセットすると、封入までにより長くピストンを動かすことになる。Fig. 3 のデ

Fig. 3. Typical examples of the sample pressure as a function of helium gas pressure.

ータ点○と●の比較からも明らかのように、試料に圧力がかかり始めるまでにより大きなヘリウムガス圧が必要となる。逆に間隔をあまり狭くセットするとアルゴンがガスケットの孔に入らないことがあるので注意が必要である。またガスケットが少し柔らかいときにはデータ点(Fig. 3 の△) を結んだ傾きは緩くなる傾向にある。

なおガスケットの材料は熱処理した Maraging Steel (マルエージ鋼あるいはマレージング鋼と呼ぶ) [13] の薄板である。この材料は加圧時の手応えや試料室形状の変形の観察から、堅くてしかも“粘り”強いことがうかがえる。先端径 0.6 mm のアンビルを使用して約 30 GPa の圧力を発生可能であることを確認している。

4. PR 測定

フォトリフレクタンス(光変調反射: PR) は変調分光法のひとつである。その特徴は、まず 1) 高感度で、室温下でもシャープで微分的な特性を持つスペクトルが許容されたバンド間遷移エネルギーにおいて得られることである。GaAs をはじめとする閃亜鉛鉱形結晶のバンド構造では、 Γ 点での基礎吸収端(E_0 端) のスペクトルは最も強く、またさらにスピン-軌道分裂エネルギー Δ_0 だけ離れた $E_0 + \Delta_0$ で観測される。それ以外に例えば

L 点での E_L 端遷移エネルギーでもスペクトルが観測される。これまでに半導体超格子などについて測定が数多く行われている。また2) 同様な変調分光法のひとつであるエレクトロリフレクタンス (ER) 測定では変調用の電極が必要であるのに対して、PR 測定ではこの電極が必要でないこと (contactless) である。これは DAC にとっては好都合である。試料に電圧を印加するには、金属ガスカートと微細なリード線との間の絶縁が必ず必要となる。しかし高圧力下でも確実な絶縁を確保できる手軽な方法はまだ少ないようである。PR 測定における反射光の変調はプローブ光とは別のポンプ光を試料表面に照射し、光生成された電子-正孔対を介して表面電界を変化させて行うことになる。

これに新たな摂動として圧力を印加すれば、さらに多くの情報を得ることが出来ると考えられる。しかし、DAC を用いた測定では試料のサイズが極端に小さく、光照射や反射光の検出を行うときの光学系の困難さもあってこれまで敬遠されてきたようである。実際、通常の PL 測定などと比較すれば高圧力下の測定例は極端に少ない。

PR 信号は $\Delta R/R$ で表わされる。ここで R は無変調時の反射の強度、 ΔR は光変調時と無変調時の反射強度の差である。スペクトル $\Delta R/R$ は (low-field regime にて)

誘電関数の微分関数形によって定義されている。得られたスペクトル形状と理論とのフィットは次式を用いて行われることが多い。ただし、ひとつのバンド間遷移だけが起こるものと考えた式である。

$$\Delta R/R = \text{Re} \left[C e^{i\theta} (\hbar\omega - E_g + i\Gamma)^{-n} \right] \quad (1)$$

ここで、 $\hbar\omega$ はプローブ光のエネルギー、 C は振幅、 θ は位相、 Γ はブロードニングパラメータ、 E_g はバンドギャップ・エネルギー (E_L 端など critical point でのバンド間遷移エネルギー) を示す。 n は考察している (遷移の起こる) critical point の形に依存する。それらの詳細は文献[14,15]などを参照されたい。

Fig. 4 は PR 測定系の例を示す。ハロゲンランプ (100 W) の光を分光器を通して単色光にしてプローブ光とする。ポンプ (変調) 光には He-Ne レーザー (632.8 nm) あるいは Ar⁺ レーザー (488 nm) を使い、100~200 Hz でチョップして試料表面上に照射する。このときポンプ光の強度があまり大きいとルミネッセンスが励起されて本来の PR 信号の観測が困難になる。ND フィルターなどで適当な強度に低下させるなどの注意が必要である。試料からの反射光はディテクター (例えば Si-フォトダイオード) 上に集光、検出される。この反射光にはポンプ光が照射されていない時の光 (R 成分) と照射されている時の変化分 (ΔR 成分) が含まれる。これらの光はともにディテクターによって電流に変換され、更に I-V コンバータを通して電圧に変換される。 ΔR 成分と R 成分は各々、ロックインアンプなどで増幅した後、パソコンに取り込んで演算処理を行い、 $\Delta R/R$ のスペクトルを得る。

この光学系の大半は通常の PR 測定と同じであるが、試料表面への入射光・反射光の角度の設定は重要である。一般的な光学測定用 DAC の入射側 (上アンビル台座) のコーンの角度は 60° 程度であるが、アンビルの高さや屈折率を考慮に入ると、プローブ光の入射角度は DAC に対してほぼ垂直 ($\sim 5^\circ$) でなければならない。そのため2種類の光ビームを試料室内へ導くためのレンズなど光学素子類が DAC 前方で接近しすぎることがある。実際の測定では、例えば DAC の直前に置いた小型ミラーで反射光の方向を変えた後にディテクターで受光する方法をとる。こうすれば微調節などの操作が容易で確実となる。

具体的な測定例として $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ ($x=0.217$) 混晶半導体の室温における PR スペクトルを示す。Fig. 5 は試料を DAC に入れない状態での、PR スペクトルである。このスペクトルに対して式(1)を当てはめることにより、

Fig. 4. Experimental setup for photoreflectance measurements.

Fig. 5. PR spectra of GaAsP at atmospheric pressure.

Fig. 6. PR spectra of GaAsP at several pressures.

バンドギャップ・エネルギー E_0 は1.675 eVと求められる。また $E_0 + \Delta_0$ の遷移エネルギーは1.963 eVと求められる。これらの値はER測定によるThompsonら[16]の結果にはほぼ一致する。またこのスペクトルにはフランク・ケルディッシュ振動(FKO)[15]も観測されている。Fig. 6は高圧力下のPRスペクトルを示す。試料が微小であることからスペクトルの質はやや劣化する。反射光を効率よく集光する、信号対雑音比(S/N)を高くす

るなど測定系の改良の余地はまだある。しかし E_0 端でのスペクトルが圧力により高エネルギーへシフトする様子は明確に示されている。すなわち0 GPaから1.38 GPaまでの圧力を印加した場合の E_0 端のPRスペクトルは約140 meVだけシフトし、その圧力係数は約100 meV/GPaであることがわかる。これは同時に測定したPLピークのシフトからも確認される。

5. TRPL 測定

時間分解フォトルミネッセンス(TRPL)は時間分解分光法(TRS)のひとつで、通常の連続光励起フォトルミネッセンス(CWPL)だけでは得ることが出来ない発光寿命あるいは発光減衰特性についての情報を直接的に得ることが出来る。従って光励起された電子-正孔が再結合することによって光子を生成する過程(発光ダイナミクス)の詳細を知るための手段として非常に有効である。

また高圧力を組み合わせたTRPLスペクトル測定は半導体のバンド構造の変化を反映した情報を引き出し、常圧下だけの研究ではなしえない新しい議論、検討を可能にする。しかし前述のPR測定の場合と同様に、通常のCWPL測定と比較すれば高圧力下のTRPL測定による研究はやはり多くない。

Fig. 7はTRPL測定系の例を示す。まずパルス動作の励起光源が必要である。最近は大格的なパルス動作のレーザーが以前よりも容易に入手可能になってきたようであるが、いくつか励起波長を変化させての測定を行うとなれば、予算的にも制約があり、それほど容易ではなくなる。ここでは安価で手軽な音響光学変調器(AOM)により連続光のArレーザー(488 nmあるいは514.5 nm)を振幅変調して光パルス(例えば、パルス幅: 40 ns、繰り返し周波数: 80 kHz)として用いている。もちろんHe-Neレーザー(632.8 nm)や半導体レーザー(例えば685 nm、780 nm)にも適用できる。

この素子は超音波による弾性媒体の屈折率変動が入射光に回折現象を与える“音響光学効果”を利用してゐる。その回折光の強度や回折角は超音波の強度や周波数により変化する。上記AOMは超音波の振幅変調により光の強度変調を行うものである。パルス形状の良否を左右する回折効率、立ち上がり時間などは素子の中心部分(音響光学媒体)に入射するレーザービームのレンズによる絞り方、その焦点位置に大きく依存する。精密な微調整のためにはAOM素子はXYZθ軸ステージに取り付ける必要がある。またこのビーム径を小

Fig. 7. Experimental setup for time-resolved photoluminescence measurements.

さくする際、入射側であまりに大きな角度で絞ると出射側での角度も大きくなってビームは広がる。従って AOM 素子から離れた位置にある DAC 内の試料表面上に十分なビーム光量で照射できないこともある。そのような場合には別のレンズにより光パルスを集光するなどの工夫が必要である。

AOM素子の駆動はパルス発生器からのパルスにより AOM ドライバーを介して行う。同時にパルス発生器から時間の基準として同じ繰り返し周波数のトリガー信号をゲート（最小ゲート幅：5 ns）を備えたフォトンカウンターへ送って同期をとる。これら装置や素子の接続にはすべて 50 Ω 同軸ケーブルを用いる。

試料からの発光は分光器（例えば、焦点距離：25 cm、グレーティング：1200 本/mm）と、光電子増倍管、前置増幅器、フォトンカウンターにより測定する。そして 1) PL 強度の減衰特性、あるいは 2) PL スペクトルの遅延時間依存性のデータは GP-IB を介してパソコンに取り込むことになる。

以下では測定例として有機金属気相成長法（MOVPE 法）で作られた GaAs/部分的秩序構造 GaInP 量子井戸構造における TRPL スペクトルを示す。

MOVPE 成長した GaAs/GaInP 量子井戸では、GaAs 量

子井戸からの発光の代わりに GaInP、GaAs いずれのバンドギャップよりも小さいエネルギー（1.35~1.46 eV）で強い発光バンド（深い発光）がしばしば観測される [17]。その主な特徴は 1) Below Band-Gap、2) 広い半値幅、3) 強い励起光強度依存性、4) （直接遷移に基づく発光と比較して）長い発光寿命、などである。この深い発光の光学遷移過程の解明のため、いくつかのグループによりヘテロ界面の構造や成長条件を変えた検討がなされてきた。

GaInP はある成長条件下では III 族原子（Ga, In）が副格子上で $\langle 111 \rangle$ 方向に交互に配列し、CuPt 型秩序構造（自然超格子構造）が部分的に形成されることが知られている。バンドギャップ・エネルギーは成長条件、従って秩序化の度合に依存し、液相エピタキシー（LPE）で作られた混晶の場合より ~120 meV も低い値を示すとともに光学的特性に様々な差異を現わす。GaAs/無秩序構造 GaInP ヘテロ界面のバンド不連続性は従来から Type-I と考えられている。しかし最近 Froyen らは GaInP が完全な秩序構造をとる場合 Type-II となることを理論的に示した [18]。秩序化度の変化に対してへ

Fig. 8. Typical PL-decay profiles of the deep emission band in GaAs/GaInP interface at 1.1 GPa. Excitation intensities are (a) 8 mW and (b) 30 mW.

テロ界面のバンド不連続性がどうなるのかはその光学的特性とともに興味深い。

我々はGaAs 井戸層 (100 Å)、部分的な秩序構造をとるGaInP 障壁層 (1100 Å) の単一量子井戸構造において、薄いGaP 中間層 (~14 Å) の有無、挿入する界面の組み合わせが異なる複数の試料を用いて深い発光の高圧力下のTRPL測定を行ってきた[19,20]。

Fig. 8はGaP層をGaAs井戸層の下側にのみ挿入した試料について圧力1.1 GPaでのTRPL測定(77 K)の例を示す。励起光強度8 mW (Fig. 8(a))では~1.56 eV近傍で検出した減衰特性はいずれも非常に遅く、深い発光バンドが優勢である。しかし励起光強度30 mW (Fig. 8(b))ではピークエネルギーは高エネルギー(~1.58 eV)ヘシフトすると共に減衰特性は検出エネルギーに強く依存する。発光ピークよりも高エネルギー側にあるGaAsバンドギャップでの発光あるいはGaAs中の不純物準位が関与する発光(その発光寿命は深い発光よりも短い)との重なりが大きくなる。すなわちCWPL測定では半値幅が広い単一のピークと見えるスペクトルでも、TRPL測定の結果によれば接近した2つ以上の発光バンドの重なりとして理解すべきであることを示している。

ここで示した深い発光はGaAs/GaInP界面を挟んで分離した電子・正孔の空間的間接遷移に基づく発光の可能性があり、GaInPの秩序構造の存在に関連した現象であることがうかがえる。高圧力下の発光減衰特性あるいはスペクトルの遅延時間依存性は発光過程を議論する上で重要な情報を与えてくれる。また圧力誘起Γ-Xバンド交差にともなって出現する新たな発光、例えば実空間、運動量空間の両方における間接遷移発光が観測できれば常圧下のバンド構造についてより詳細な検討が可能になる。

6. おわりに

本稿では半導体の光学的特性を測定するためのペローズを組み込んだDACと圧力媒体アルゴンの封入方法について紹介した。また現有のPLや光吸収などの測定系をもとにして、いくつかの装置や素子を導入すれば、半導体の光学的特性について別の観点から議論、検討を可能にするPRあるいはTRPL測定系が構築できる例を示した。しかし試料を入れさえすれば直ちにデータが得られるという完成した系ではなく、感度、S/Nや時間分解能など改善すべき点はまだ多い。電子回路をはじめとして手作り可能な部分が多くあるので、少ない

予算でも研究者の工夫次第で測定系全体の性能を飛躍的に向上できる可能性がある。

高圧力下でのこれらの測定は新しい半導体の光学的特性やバンド構造を調べる上で非常に重要な情報を与える可能性が高い。これから高圧力下の光学的特性の研究を始めようとする、あるいは次のステップを考えておられる方々のご参考になれば幸いである。

謝 辞

DACなど実験技術の多くに携わってくれた北山良和技官に感謝する。本稿の一部は平成9年度~平成10年度文部省科学研究費補助金(基盤研究(C))ならびに川西記念新明和教育財団による研究助成の成果であることを記して謝意を表する。

参考文献

- [1] K.R. Hirsh, W.B. Holzapfel: Rev. Sci. Instrum., **52**, 52-55 (1981), "Diamond anvil high-pressure cell for Raman spectroscopy".
- [2] R.W. Shaw, M. Nicol: Rev. Sci. Instrum., **52**, 1103-1104 (1981), "Simple low-temperature press for diamond-anvil high pressure cells".
- [3] D.J. Dunstan, W. Scherrer: Rev. Sci. Instrum., **59**, 627-630 (1988), "Miniature cryogenic diamond-anvil high-pressure cell".
- [4] A.W. Webb, D.U. Gubser, L.C. Rowle: Rev. Sci. Instrum., **47**, 59-62 (1976), "Cryostat for generating pressures to 100 kilobar and temperatures to 0.03 K".
- [5] W.B. Daniels, M.G. Ryschkewitsch: Rev. Sci. Instrum., **54**, 115-116 (1983), "Simple double diaphragm press for diamond anvil cells at low temperatures".
- [6] R. Letoullec, J.P. Pinceaux, P. Loubeyre: High Pressure Research, **1**, 77-90 (1988), "The membrane diamond anvil cell: a new device for generating continuous pressure and temperature variations".
- [7] T. Kobayashi: Rev. Sci. Instrum., **56**, 255-259 (1985), "Diamond-anvil high-pressure cell for optical spectroscopy at low temperature".
- [8] 小林利彦: 高圧力の科学と技術, **3**, 180-182 (1994), "ペローズを用いたダイヤモンドアンビルの駆動方法".
- [9] D.H. Liebenberg: Phys. Lett., **73A**, 74-76 (1979), "A new hydrostatic medium for diamond anvil cells to 300 kbar pressure".
- [10] 松田康弘, 黒田規敬: 高圧力の科学と技術, **4**, 322-323 (1995), "クランプ式DACのための簡易Ar液化装置".

- [11] 竹村謙一, P.Ch. Sahu, 國井敬泰, 当麻恭男: 高圧力の科学と技術特別号 第39回高圧討論会講演要旨集 2P01, 94 (1998), “ダイヤモンドセル用高圧ガス充填装置”.
- [12] 北山良和, 大前貴志, 小林利彦: 高圧力の科学と技術特別号 第39回高圧討論会講演要旨集 2P02, 95 (1998), “ダイヤモンドアンビル高圧セルにおける圧力媒体アルゴンの封入”.
- [13] 例えば, 長崎誠三: 固体物理, **10**, 362 (1975), “固体物理用語 マルエージ鋼” に簡単な解説がある.
- [14] D.E. Aspnes: Surf. Sci., **37**, 418-442 (1973), “Third-derivative modulation spectroscopy with low-field electroreflectance”.
- [15] D.E. Aspnes: in *Handbook on Semiconductors, Vol. 2, Optical Properties of Solids*, ed. M. Balkanski, North-Holland Publ., Amsterdam - New York - Oxford, 1980, pp. 109-154, “Modulation spectroscopy/electric field effects on the dielectric function of semiconductors”.
- [16] A.G. Thompson, M. Cardona, K.L. Shaklee, J.C. Woolley: Phys. Rev., **146**, 601-610 (1966), “Electroreflectance in the GaAs-GaP alloys”.
- [17] K. Uchida, T. Arai, K. Matsumoto: J. Appl. Phys., **81**, 771-776 (1997), “Deep emission band at GaInP/GaAs interface”, and references therein.
- [18] S. Froyen, A. Zunger, A. Mascarenhas: Appl. Phys. Lett., **68**, 2852-2854 (1996), “Polarization fields and band offsets in GaInP/GaAs and ordered/disordered GaInP superlattices”.
- [19] T. Kobayashi, A. Matsui, T. Ohmae, K. Uchida, J. Nakahara: phys. stat. sol. (b), **211**, 247-253 (1999), “Time-resolved photoluminescence study of GaAs/ordered GaInP interface under high pressure”.
- [20] T. Kobayashi, T. Ohmae, K. Uchida, J. Nakahara: Jpn. J. Appl. Phys., **38**, 1004-1007 (1999), “Pressure dependence of photoluminescence in GaAs/partially ordered GaInP interface”.

[1999年8月18日受理]