

半導体環境学

(環境安全に配慮した稀少元素リサイクルに関する研究)

和泉 茂一*, 菅野 剛*, 白濱 弘幸**, 伊藤 満***, 内田 雅和***, 田尾 鋭司***

Environmental safety issues for semiconductors
(Research for scarce material recycling)

Shigekazu Izumi*, Tsuyoshi Sugano*, Hiroyuki Shirahama**,
Mitsuru Ito***, Masakazu Uchida***, Eiji Tao***

Abstract : In the 21st century, in the fabrication of various industrial parts, in particular, current and future electronics devices in the semiconductor industry, environmental safety issues should be carefully considered. We coined a new term, “**environmental safety issues for semiconductors**”, for our consideration of semiconductor research and technology which consider environmental and ecological factors. The main object of this analysis is the present situation of environmental safety problems in the semiconductor industry; some of the issues considered are: (1) the generation and use of hazardous toxic gases, such as AsH₃, PH₃, GeH₄, Cl₂ and HCl in many processes such as crystal growth, etching, CVD, and annealing; (2) the generation of industrial toxic wastes in the semiconductor process and the recycling of these wastes. We mainly focused the topic on crystal growth process in III-V compound semiconductor, such as molecular beam epitaxy (MBE) and metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD).

Keywords : Scarce material recycling, Arsenic, Gallium, MBE, MOCVD

1. はじめに

半導体が基板となる電子技術関連の世界市場規模は 100 兆円に達し、現状では自動車市場を抜いて最大規模の産業になっている。半導体自身も電子技術産業の 15% 程度の約 15 兆円の市場規模に到達しており、今後も年平均 15% 程度の成長率

(2000 年 12 月 6 日受理)

* 宇部工業高等専門学校 制御情報工学科

〒755-8555 山口県宇部市常盤台 2-14-1

E-Mail: izumi@ube-k.ac.jp

URL : <http://www.ube-k.ac.jp/~izumi/>

** 宇部工業高等専門学校 電気工学科

*** 長州産業株式会社 真空機器部

〒757-0003 山口県厚狭郡山陽町大字山野井字

新山野井 3740 URL : <http://www.choshu.co.jp/>

(国内総生産 (GDP) の 3 倍以上) が予想される。半導体産業が世界経済の重要なけん引力となっていることは周知の通りである。

半導体による技術の進展が我々の生活水準をこれほどまでに高揚させたことは驚異に値するものの、その代償も同様に大きくなりつつある。近年、環境問題が注目されているのは技術の進展を優先したが故の大量生産、大量消費、大量廃棄の一方通行型産業の呈した課題に起因する。半導体を中心とする電子材料の研究開発や製造は多くの有害物質を扱い、更にこれら有害物質は稀少元素である場合が多く、安全、廃棄物処理、資源枯渇、リサイクルといった多面的な環境問題を誘発する。

1999 年 7 月の第 145 通常国会で化学物質排出管理促進法 (化学物質管理法 : PRTR 法) が成立した。この他にも環境関連 5 法案が成立して国内の

環境に対する関心は高まりつつある。PRTR 法はこれまでにない画期的な法案ではあるものの、この法案を実りあるものにするかは企業内の自主性に達うところが少なくない。過去 5 年に渡る 2000 年までの環境関連法の主な動きを表 1 にまとめる¹⁾。1997 年 12 月に開かれた地球温暖化防止京都会議 (COP3) 以降の環境法制定が目立ち、その動きは今後も更に活発化することが予想される。

異なる側面として環境マネジメントシステム (ISO14001) の認証取得活動がある。環境保全は欧州が先行しているが認定数は日本が世界一であり、全世界に占めるその割合は 25% を上回る (2000 年 4 月現在、国内 3548 件、世界では 12279 件が認定取得)。1996 年 9 月にこの規格が発足してわずか 3 年半で取得件数が 10000 件を上回った事は環境問題の世界的広がりを示す一つの指標と言えよう²⁾。ところが日本での取り組みは欧州各国に比較して主体性、具体的認知度に欠け、安全化問題を包括した質的問題点があると思われる。このような観点から、国内主体の工業分野における環境及び安全配慮への多面的な取り組みが早期に必要であり、法令や環境マネジメントに環境安全の問題意識を組み合わせた自発的展開が必要である。ISO14001 に続く動きに安全危機管理を環境対策の一環として捕らえよう

表 1 過去 5 年間の環境関連法案の概要

1995年	”容器包装リサイクル法” 成立
1996年	”大気汚染防止法” 改正
1997年	”河川法” 改正 ”新エネルギー法” 制定 ”大気汚染防止法” 改正 ”廃棄物処理法” 改正 ”環境アセスメント法” 施行 ”容器包装リサイクル法” 施行
1998年	”家電リサイクル法” 制定 ”オゾン層保護法” 改正
1999年	”地球温暖化対策推進法” 施行 ”PRTR法” 制定 ”ダイオキシン類対策特別措置法” 制定 ”改正省エネ法” 施行
2000年	”容器包装リサイクル法” 完全実施 ”循環型社会基本法” 制定 ”食品リサイクル法” 制定 ”建築資材リサイクル法” 制定 ”グリーン購入法” 制定 ”再生資源利用促進 (リサイクル) 法” 改正 ”廃棄物処理法” 改正

とする動きがある。ISO18000 という労働安全の国際基準の認証取得が検討されている動向がそれに当たり、今後注目される。

本論文では前述した背景から半導体を中心とする材料分野で消費/発生/廃棄される有毒ガス/溶液の処置、危険性の高い産業廃棄物の処置/リサイクル、危険作業の軽減を目標に掲げ研究に取り組んでいる。特に有毒物質を含む化合物半導体結晶成長工程で生じる産業廃棄物の無害化処理と、その中に含まれる稀少元素のリサイクルについての途中結果を報告する。

2. 半導体環境学の概念

天然元素の Si を加工している一般的な民生用半導体であってもそのプロセス中に有毒ガス、有毒溶液を大量に消費/廃棄している。化合物半導体に至っては材料そのものが有毒物質を含んでいたり、非常に危険性の高いガスを大量消費/廃棄し、その副産物も危険性の高い物質が多い。近年、“環境半導体³⁾” といった概念が注目されつつあるのはこのような背景に起因している。

21 世紀には環境共生を念頭に於いた研究/開発体制が要求され、半導体関連技術の今後の展開は図 1 のように予想される。効率、性能のみに重点を置いた研究開発は、今後世間一般から認められなくなり、環境側面への配慮なくしては万事成り立たなくなる可能性が高い。筆者らが訴えている”半導体環境学⁴⁾” とは半導体産業の環境負荷低減を提言するものであり、今後その重要性は高くなると考える。

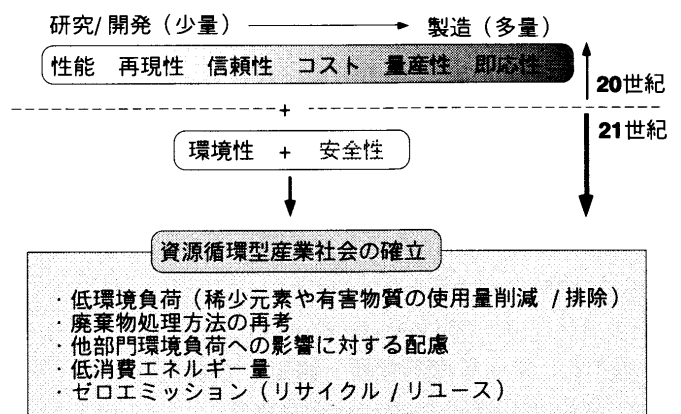


図 1 今後の半導体関連技術に必要なとされる環境安全のコンセプト

3. 半導体環境学の具体的課題

3.1 化合物半導体における結晶成長工程の現状

化合物半導体のデバイス開発に欠くことができないのがエピタキシャル結晶成長技術である。1980年代に液相成長（Liquid Phase Epitaxy : LPE）に変わって分子線エピタキシー（Molecular Beam Epitaxy : MBE）^{8,9)}、有機金属化学気相成長（Metalorganic Chemical Vapor Deposition : MOCVD）¹⁰⁾、また1980年代後半には化学ビームエピタキシー（Chemical Beam Epitaxy : CBE）¹¹⁾による結晶成長技術が著しく向上し、高性能なデバイス開発に必要とされる高品質な結晶成長が可能となった。MBE, MOCVD, CBEの発展はその特性が結晶独自の物性によって決まる化合物半導体のデバイス開発に対して大きな進捗をもたらした。

IT（Information technology）産業の発展に伴い特殊用途半導体の需要拡大が急速に進んでいる。ガリウム砒素（GaAs）を材料に用いる高周波素子や光素子は、現状ではその供給がユーザーからのニーズに追いつかない状況で、その結果として化合物半導体ビジネスは成長率50%程度の勢いで伸びている。例えばGaAsアナログデバイス市場は1999年において24.5億ドル市場、年成長率は52%である¹²⁾。化合物半導体結晶工程のニーズも同様な状況で成長している。その量産技術は世界的に見ると欧州を除くアメリカ、台湾、日本がMBEとMOCVDを併用している。有毒ガスを多量に使用するMOCVDでの量産は環境保全の問題から欧州には受け入れられないのである。いずれにしてもその生産量は数年前の予想を大きく上回る状況にあり、近い将来環境問題に抵触する可能性は非常に高い。

3.2 化合物半導体結晶成長工程での 環境安全に対する課題

半導体環境学における具体的課題として化合物半導体結晶成長工程が挙げられ、以下に示す環境安全上の問題が生じている。

(1) 有毒性産業廃棄物の処置と稀少元素の枯渇

例えば、MBEによる結晶成長工程は毒性の強い金属砒素（As）を原材料として大量に使用するが、

その97%以上が廃棄物になる。昇華されたAsをクラッキングする手法を用いても90%以上の廃棄率である。MOCVDにおいても同様な課題を呈し、原料に使用する100%アルシン（AsH₃）の使用効率は高々20%程度でしかない。年に数回のメンテナンス時に排出される有毒性産業廃棄物は量産機1台当たり数10Kgにおよぶ。現状での量産機の台数は世界的に見ると数百台に及ぶことから、その廃棄物量は年間数10tに及ぶ。これらが現状ではそのまま（有毒な状態で）産業廃棄物となり、且つ有効活用されていない状況にある。図2に問題となっている廃棄物、及びそのX線分析結果を示す。多量の砒素を含み毒性が強いことから一般的な産業廃棄物と同様には扱えず、廃棄処理方法に一考を呈することは明らかである。

異なる視点から上記問題を再考する。GaAsをベースとする化合物半導体の製造工程では稀少元素のガリウム（Ga）が大量に必要とされ、その資源枯渇が全世界的に深刻な問題となっている。その議論は2000年9月に北京で開催された第11回分

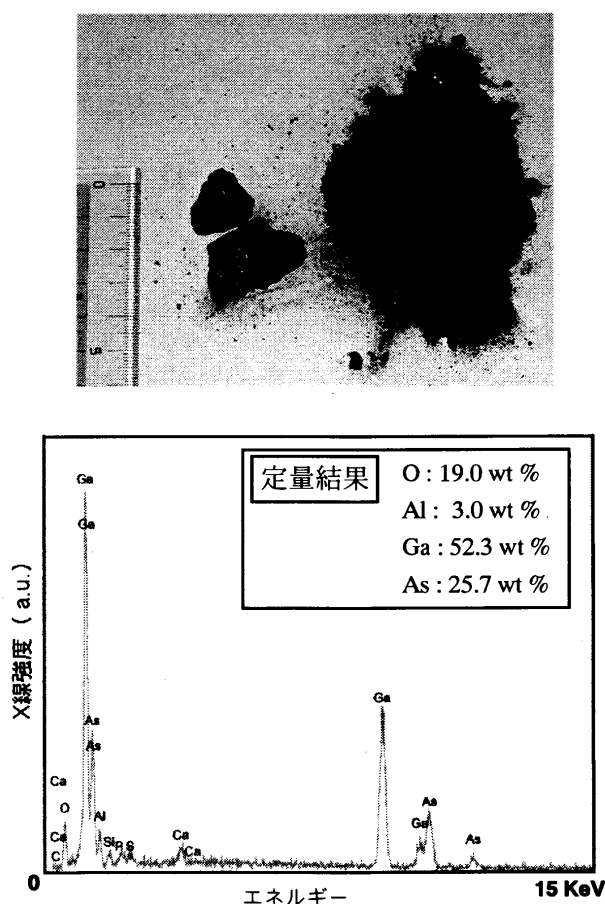


図2 砒素を含む有毒な産業廃棄物とX線分析によるその定性/定量評価

子線エビタキシーの国際会議 (ICMBE-XI) でも話題となった。使用量から推定するとインジウム (In) よりその枯渇時期が早まる可能性すらある。As に関しても供給不足が生じている。従ってこのような有毒性産業廃棄物を無害化処理し、資源として再利用できるのであれば非常に好都合である。

(2) 装置大気開放時における有毒ガスの発生

半導体工程の中で特に多くの危険ガスを使用するのが化合物半導体の結晶成長工程である。結晶成長の主だった手法である MBE と MOCVD では AsH₃, PH₃ 等の有毒ガスの多量な使用/廃棄, ガスの取り扱い, メンテナンス時に有毒ガスの生成/漏洩等の多くの問題を有する⁽¹³⁾。その発生量は TLV 値 (Threshold Limit Value/ 許容濃度) 50ppb を遙かに上回る場合が少なくない。環境, 安全両側面から問題視される事実であり, 環境安全に関連した多くの課題を提起する工程といえる。Cl₂, HCl, NF₃, SF₆ 等のハロゲンガスも環境配慮からは無視できない。従って同様な配慮がエッチング, CVD (Chemical Vapor Deposition) 工程にも必要である。

結晶成長装置の大気開放時に意図せぬ AsH₃ の発生する原因の一つは以下のような反応に基づく⁽¹³⁾。



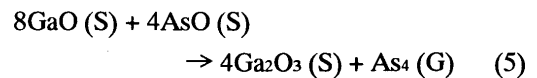
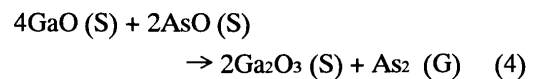
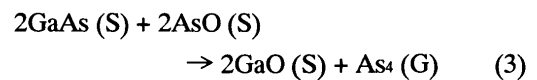
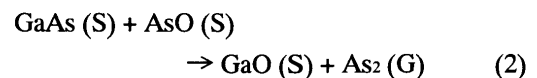
チャンバー内に残存する AlAs が大気中の水分と反応することで AsH₃ が生成される。Al 分子線セル付近では多量に AlAs が存在するのでレベルの高い AsH₃ 生成反応が観測される。MOCVD では原料に多量の 100%AsH₃ を用いており, その安全化対処が絶えず問題になっているが, 視点を変えれば意図した使用環境に対しての安全化対処は容易である。これに対して AsH₃ 漏洩問題は 1996 年頃から指摘されてきた比較的新しい事実であり, その対策は非正常な要因を多く含んでいる。

上記反応以外にも AsH₃ 漏洩が観測されている。GaAs をベースとした結晶成長工程で排出される廃棄物は装置開放による取り出しの際, 大気中の水分と反応し酸化物を形成する。その主成分は, As 系物質 (As₂O₃, As₄O₆: 三酸化二砒素, As₂O₅: 五酸化二砒素) と Ga 系物質 (Ga₂O₃: 酸化ガリウム) に分類できる。その他, 多結晶 GaAs の存在が考えられる。微量な含有物には Al, In, およびそれらの酸化物

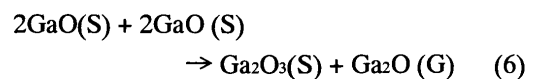
と廃棄物内に含まれる全ての元素の化合物が考えられる。ここでは微量な元素は考慮に入れず主成分の反応のみに注目する。

利根ら⁽¹⁴⁾ の報告によると, GaAs ウエハ上の酸化物を真空中で加熱すると以下のような反応が起こる。(S), (L), (G) はそれぞれ固体, 液体, 気体状態であり, 気体状態は揮発することを示す。

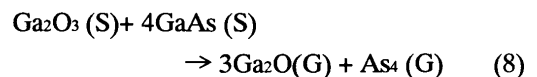
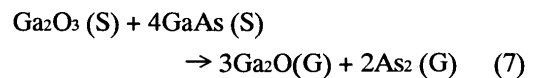
・ Desorption at 390°C



・ Desorption at 475°C

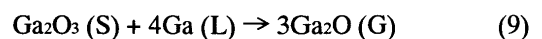


・ Desorption upper 500°C



酸化物はその化学結合を外部エネルギーによって変化させ, 揮発しやすい状態に変化する。Ga₂O は揮発性物質であることが知られており, 以下のような反応式から得られる。

・ Reaction at 700°C

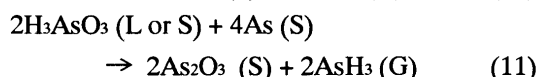
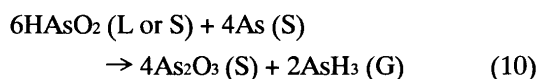


(a) As 系物質

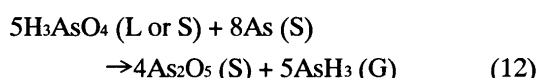
分別回収用試料収集過程での三酸化二砒素 (無水状態での As₂O₃: 亜ヒ酸), 五酸化二砒素 (無水状態での As₂O₅: ヒ酸) の生成過程を考える。三酸化二砒素, 五酸化二砒素はともに水に溶解, 五酸化二砒素は特に良く溶解し亜ヒ酸, ヒ酸を発生させる事が知られている。大気中水分と砒素が反応する場合, 水和物反応の一部として以下のように考えることができる。

(i) 亜ヒ酸反応: メタ亜ヒ酸 HAsO₂, オルト酸

H₃AsO₃を単純な砒素との反応で考えると、



(ii) ヒ酸反応：オルトヒ酸 H₃AsO₄ による単純な砒素との反応で考えると、



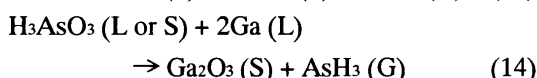
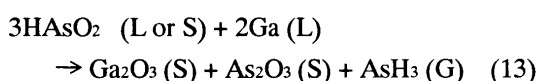
いずれの反応に於いてもAsH₃が生成される。五酸化二砒素は加熱すると容易に酸素を放出し三酸化二砒素になること、また単純に砒素と酸素を加熱することでは得られないので、ヒ酸反応よりも亜ヒ酸反応の方が量的には多いことが予想される。

(b) Ga系物質

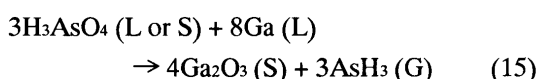
ガリウムは酸化することで揮発性の高いGa₂Oを生成するので、分離回収処理を行う試料にGaが酸化状態で含まれることは非常に都合が悪い。また、As系化合物との蒸気圧差はほとんどなく、高々100°C程度の温度差でAsと同様な揮発反応が生じると言われている¹⁴⁾。

ガリウム酸化物である三酸化二ガリウムの生成過程を考える。ガリウムは安定な金属液体であり、大気中水分や酸素とは簡単に反応しない。酸に対しては水素を放出して溶ける性質があるので、砒素水和物との反応から以下のように考えることができる。

(iii) 亜ヒ酸反応：メタ亜ヒ酸 HAsO₂、オルト酸 H₃AsO₃による反応



(iv) ヒ酸反応：オルトヒ酸 H₃AsO₄ による反応



いずれの反応に於いてもAsH₃が生成される。Alが含まれない砒素系廃棄物からもAsH₃が発生することは確認済みなので、亜ヒ酸、ヒ酸の反応によるAsH₃生成過程を以上のように考えた。

4. 稀少元素回収装置の開発

III-V族化合物半導体の結晶成長工程で発生する産業廃棄物からGaとAsを分別回収するには以下のような注意が必要である。

- ・ Ga酸化物をGa₂Oにしてはいけない。
- ・ Ga酸化物を金属Gaに分離する反応では、反応後に分離されたGaを揮発させない温度範囲での加熱処理とする。
- ・ 亜ヒ酸、ヒ酸をAsH₃に変えることなく金属砒素にして昇華させる。金属砒素は酸化性が強く、大気中で反応させても直接的にAsH₃を生成しにくい。(各工程への安全配慮の必要性)

有毒性産業廃棄物は、見方を変えると稀少元素を多量に含む有用な資源である。この資源をリサイクルするに当たり、As系廃棄物を単に加熱するだけであれば蒸気圧の高いGa₂Oが発生し蒸気圧差による分離回収はできない。また亜ヒ酸、ヒ酸を無水性砒素酸化物にすると、加熱処理後の状態から処理前以上のAsH₃が生成され、安全面からも適切ではない。

4.1 実験方法

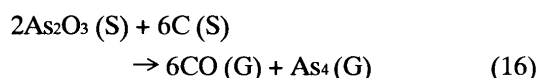
ここでは前述した課題を解決するため、還元反応雰囲気中での加熱処理方法を用いた。本実験では還元剤としては一般的である固体炭素粉末 (TIMREX Graphite / KS 15) を用いたが、還元性ガスで代用する事も可能である。当該還元性ガスとしてはCOを含むガスが考えられる。

(1) As系廃棄物と還元剤量との比率について

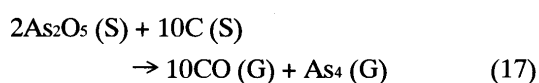
実際の実験では還元剤として代表的な固形炭素 (含有比率 99%, 粒径48μm) を用いた。なお、比率は全て重量%を表す (以下同じ)。ここで、上記As系廃棄物量：還元剤量の比を酸化砒素及びガリウム量と炭素量との重量比で換算する。廃棄物中の酸化砒素含有量 90%, 酸化ガリウム含有量

10%、還元剤中の炭素の含有量 99%以上として次のように考える。

酸化反応を有する砒素系廃棄物で亜ヒ酸の還元反応を考えると、



亜ヒ酸 2 mol に対して炭素系還元剤は 6 mol 必要で、重量換算では廃棄物：還元剤=100：18となる。ヒ酸の還元反応は、



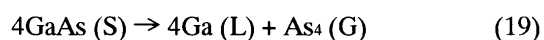
ヒ酸 2 mol に対して炭素系還元剤は 10 mol 必要で、重量換算では廃棄物：還元剤=100：26となる。酸化反応を有する砒素系廃棄物はその主たるものが亜ヒ酸であると考えられるので、(17)の反応が100%起こることは考えにくい。従って、100：26が混合比の上限と考えられる。

酸化反応を有するガリウム系廃棄物の還元反応を考えると、



ガリウム酸化物 2 mol に対して炭素系還元剤は 6 mol 必要で、重量換算では廃棄物：還元剤=100：19となる。上記の推定に加えて亜ヒ酸の還元反応が主であること、且つ完全に亜ヒ酸でないAs系廃棄物量に対する還元剤量を考えるのでそれらの混合比は 100：10～20の範囲が適切と考える。還元剤量が規定値より増加すると未反応の炭素残渣が増加するため、排気処理物と残渣等の事後処理が難しくなる。逆に還元剤量が少ない範囲では回収率は単純に増加するが、未処理部分が生じる。

この他に多結晶GaAsの揮発反応を考える必要があるが、GaAs自体は酸化物が介在しない加熱過程ではAsが昇華、Gaは分離後に液体で加熱処理槽内に残ることを確認している。このような状況での分離回収は容易で、以下に反応式を示す。



次に分離回収に必要な反応温度について、利根

ら¹⁴⁾の報告にあるGaAsウエハ上酸化膜の真空加熱実験から考える。390℃くらいから砒素及びガリウム酸化物の化学反応が始まるとされ、還元剤による反応は還元される側の化学反応に依存することから、本実験でも同様な反応温度が考えられ、その下限値は400℃と推測できる。

高柴ら¹⁵⁾による酸化錫の還元処理方法では処理温度を600～1200℃の範囲に設定してる。その結果、処理温度600℃～900℃の範囲では還元反応時間が不足し、70%未満の低いSn回収率しか得られていない。処理温度が900℃を超えると速やかに還元反応が進行する。これは900℃以上ではソリューションロス反応により還元反応が迅速化するためである。ソリューションロス反応とは発生する温度範囲において必要十分な炭素還元剤が存在すれば、還元反応によって生成されたCO₂がCOになり、このCOガスにより再度還元反応が起こる現象である。より完全な分離回収処理を行うには900℃以上の加熱が有効と予想される。

4.2 実験装置

実験装置の概要を図3に、またその実体写真を図4に示す。今回製作した装置の構成は大きく2つに分類でき、廃棄物を充填した後に中真空(10⁻⁶Torr程度)までに排気してチャンバー内で1400℃まで加熱/気化させる加熱室と、揮発した試料を分別回収する回収室からなる。回収室へのライン数は回収したい元素の数に応じて決定される。例えば廃棄物がGaInAsPで回収したい元素がAsとPであれば回収室を2系統設ければよい。蒸気圧が最も低い元素が加熱室の坩堝内に残ることになる。各部の詳細を以下に説明する。

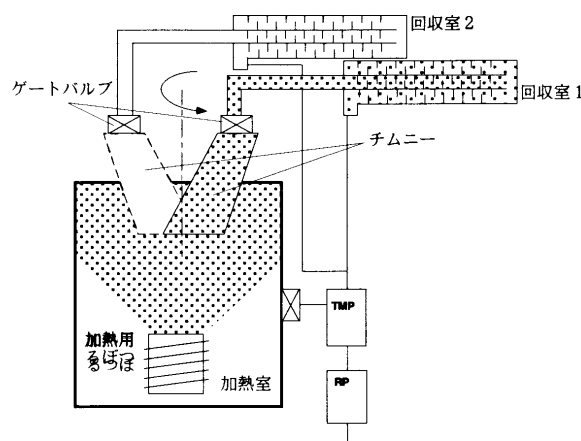


図3 稀少元素回収装置の概要

(1) 加熱室

加熱室には分別回収する廃棄材料を加熱／揮発させるための坩堝（PBN：Pyrolytic Boron Nitride 製）があり、1400°Cまでの加熱が可能である。As系の廃棄物であれば一般的にはIII族元素としてGa, In, Al, V族としてP, Sb等の混入が考えられる。III族とV族元素の分別はその蒸気圧が大きく異なることから容易に行える。

各温度別に揮発する元素は別々の回収ラインにチムニーで方向を切り替えることによって導かれる。また揮発した元素が装置及び配管内に付着しないように処理中には装置全体が180～200°C程度に加熱保温される仕組みになっている。

(2) 回収室

加熱室から揮発した試料を凝縮して回収するのが回収室で、回収ラインには扇形の仕切板があり水冷によって常温以下に低温保持されている。揮



図4 開発中の稀少元素回収装置
(1号機/プロトタイプ)



図5 稀少元素回収装置の回収室内
(Asを分離回収した状態)

発元素は仕切板に衝突することでエネルギーを失い凝縮し付着する。この回収部は揮発元素を効率よく固化し、且つ回収物が容易に取り除ける構造でなければならない。らせん状の仕切板はランダムに途切れ、回収室の内側と外側を2重に回る構造で、回収室外部に回収試料が排出されない構造になっている。この仕切板はユニットとして簡単に取り外しができ、分離回収が完了した試料は容易に採取できる。回収室内管の様子を図5に示す。写真はAsの分離回収処理を行った後、回収室内ユニットに付着した試料を回収する際の様子を示している。

4.3 実験結果及び考察

(1) 有害物質のリサイクル／稀少元素の回収結果

実験では還元剤に固体炭素を用いて、As系廃棄物量：還元剤量=100：13.3で混合した後、790°C、877°C、1000°Cで約3時間加熱した。高柴ら¹²⁾によると、処理温度600°C～900°Cの範囲では還元反応時間が不足するとあるが、本発明では800°C以下では廃棄物の分離回収は全くできなかった。これに対して877°Cでは還元剤による還元効果が観測され、1000°Cにおいては廃棄物からのGa, Asそれぞれの分離回収が可能となった。装置の制約上、現有機では1000°C以上の加熱処理ができなかったので分離回収効率の温度依存性を得るには至っていない。反応は温度が高いほど活性化され、その回収効率には最適温度が存在することが予想されるが、現状までには確認できていない。

反応温度が1200°Cをこえると、回収損失割合が増加しはじめることが予想される。これはGaの蒸気圧が1000°Cで 10^{-3} Torr, 1200°Cでは 3×10^{-2} Torr, 1300°Cでは 10^{-1} Torrに達し、その蒸発が無視できない量になるためである。1000°Cにおいても還元されたGaの多くが蒸発し、坩堝内ではなくチャンパー内壁面に付着していた。その様子を図6に示す。このことから還元反応による処理温度の上限値は1000°Cとすることが適切であり、900～1000°Cで処理温度と処理時間を最適化する必要がある。

(2) 装置大気開放時に発生する有毒ガスの抑制

前述した有毒性産業廃棄物はそのままでは化学的に不安定であり、大気中に放出すると多量のAsH₃を発生する。本装置を用いた化学処理では廃

棄物のリサイクルができるだけでなく、その残留物の有毒性を著しく低減できることを確認している。処理前の廃棄物からは検知器の上限（150ppb）を大きく上回る（おそらく ppm オーダー） AsH_3 が検知されたが、処理後は最大 150ppb 程度に低減され、TLV（50ppb）は上回るもののその生成量が著しく抑制されることを確認した。回収したりサイクル元素を図 7 に、有毒性低減を確認した処理後の廃棄物を図 8 に、また本校学生が長州産業メカトロ工場内の実験室にて本実験に取り組んでいる様子を図 9 に示す。

6. まとめ

半導体環境学の具体的取り組み例として化合物半導体結晶成長工程での産業廃棄物の有毒性低減処置，その中に含まれる稀少元素のリサイクルの可能性について検討し，以下の結果を得た。

- (1) 有害物質のリサイクル／稀少元素の回収
 - ・純度 97% 以上の As 回収に成功した。
 - ・酸化反応を含む砒素系廃棄物からの稀少元素（ここでは Ga）回収の可能性を見いだした。
- (2) 装置大気開放時に発生する有毒ガスの抑制
 - ・還元反応を用いた化学処理では廃棄物のリサイクルができるだけでなく，その残留物の有毒性を著しく低減できることを確認した。

本研究が半導体産業における環境安全配慮の一具体例になれば幸いである。

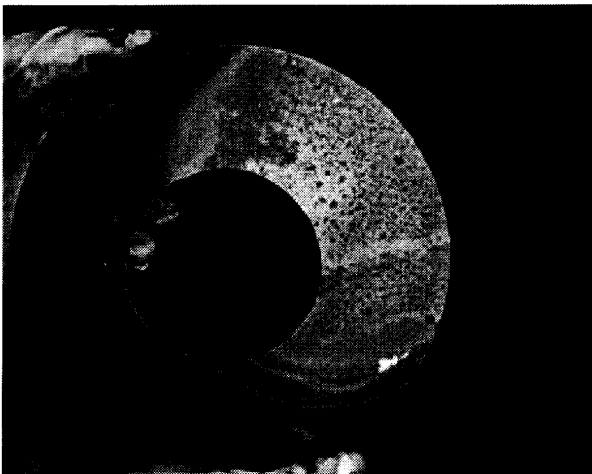


図 6 加熱室内壁板に蒸発付着した Ga
(酸化物からの Ga 還元は確認済み)



図 8 有毒性低減を確認した
化学処理後の産業廃棄物



図 7 有毒性産業廃棄物から回収された
砒素とガリウム



図 9 稀少元素回収装置での実験の様子

5. おわりに

今回の実験は初めての取り組みであり、装置的な制約が多かったので完全な実験遂行が困難であった。現在2号機の製作に取りかかっており、引き続き実験を継続する予定である。本論文の詳細は2000年12月6～8日、千葉／幕張メッセで開催されるセミコンジャパン/2000で発表される。また、本取り組みは長州産業株式会社/真空機器部殿との共同研究であり、やまぐち産業振興財団の協力も得た産官学一体での研究成果である。

謝辞

本論文で紹介した研究成果は多くの方々からの研究奨励金を活用させていただくことで得られた結果です。多大なご協力を頂きました長州産業株式会社/真空機器部殿、並びに日鉱マテリアルズ株式会社/磯原工場戸田分室殿に深く感謝いたします。長州産業殿には本実験で用いた稀少元素リサイクル装置の製作もご担当いただき、2号機の製作にも引き続きご協力頂いております。また、リサイクル試料、測定機器等をご提供頂いた三菱電機株式会社/高周波素子事業統括部殿にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 三橋規宏, 日経エコロジー9月号, pp.58, 2000.
- 2) 日経エコロジー10月号 (ISO World) pp.130, 2000.
- 3) 牧田雄之助, 日本物理学会誌 Vol.53, No.11, 858, 1998.
- 4) S. Izumi, Y. Kouji, 11th Int. Conf. on Molecular Beam Epitaxy Abstract, Beijing (P8.6), 610, 2000.
- 5) 和泉 茂一, 2000年春季第47回応用物理学関係連合シンポジウム”エコ・エレクトロニクス実現に向けた環境半導体の現状と将来” 29p-YG-9 講演予稿集 No.0 pp.69.6 (2000年3月29日/青山学院大学).
- 6) 和泉 茂一, 第一回環境半導体シンポジウム WO-1, pp.23-26 (1999年12月21-22日/埼玉大学).
- 7) 和泉 茂一, エコデザイン '99 ジャパン・シンポジウム pp.110-113 (1999年12月10-11日/東京ビックサイト).
- 8) John E.Davey, and Titus Pankey : J.Appl.Phys. **39**, 1941, 1968.
- 9) A.Y.Cho, and J.R.Arthur: Progr. Solid. State. Chem. **10**, 157, 1975.
- 10) H. M.Manasevit, Appl.Phys.Lett.**12**, 156, 1968.
- 11) W.T.Tsang, Appl.Phys.Lett.**45**, 1234, 1984.
- 12) Compound semiconductor, Vol.6 No.6 pp.27, August / 2000.
- 13) S. Izumi, Y.Kouji, and N.Hayafuji: J. Vac. Sci. Technol. **B17(3)** May / Jun, 1011, 1999.
- 14) K.Tone, M.Yamada, Y.Ide, K.Katayama, Jpn.J.Appl.Phys. **31**, L721, 1992.
- 15) 高柴信元, 佐藤良親, 公開特許公報 (A), 特開平 10-001728.