

宇宙における新素材の創製



技術解説

浜川圭弘*

Fabrication of New Material in Space

Key Words : New Material, Synthetic Semiconductor, Molecular Beam Graphoepitaxial Growth, Oxygen Free Environment

1. は し が き

宇宙開発は、おそらく20世紀の科学技術が果した人類の偉業の一つとかぞえて良さそうである。1957年10月のスプートニクの打ち上げ以来、お月様を往復した“アポロ計画”やボイジャーによる“惑星探査”など、すでに周知の通りである。わが国でも、1970年“おおすみ”にはじまる様々な科学衛星や通信衛星に続いて、平成4年9月の毛利衛さんの飛行による第1次材料実験“ふわっと'92”，そして、昨年は向井千秋さんの第2次国際微小重力実験室IML-2 (Second International Microgravity Laboratory) が成功した。いよいよ、有人宇宙活動という新しいステップが拓かれたのである。そして、来年は若田耕一さんのスペースシャトル、さらには1999年に打ち上げが予定されている日の丸スペースステーション計画など、今後のスケジュールも着々と準備されつつある。

筆者は、“ふわっと'92”の材料実験部門で“新種アモルファス半導体の創製”という研究課題のPI (Principal Investigator 主幹研究員**) の立場でお世話になった。この実験の遂行には、

研究計画ならびに地上予備実験を含めてほぼ15年がかけられた。そして、その間に宇宙空間の特殊性について勉強するうちに、われわれ材料屋の立場から今後ますますこの人類にとっての新天地—宇宙空間—が魅力にあふれた特質をもつことに気付いた。本稿は、まず宇宙空間が新素材の創製という立場から、その魅力点をあげ、次いでその一例としてふわっと'92におけるわれわれの実験成果の1部を紹介し、さらにスペースステーション計画を含む“ソーラーブリーダ計画”のあらましを御紹介してみたい。

2. 宇宙空間の特質と材料家からみた魅力点

新材料の創製という立場から宇宙環境をみた場合、まずその特徴は図1に示すように、よく知られた微小重力のほかに、超高真空や熱輻射を100%吸収する黒体空間、そして良好な視界

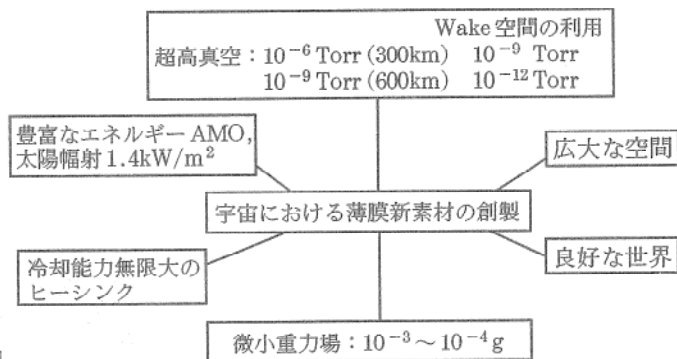
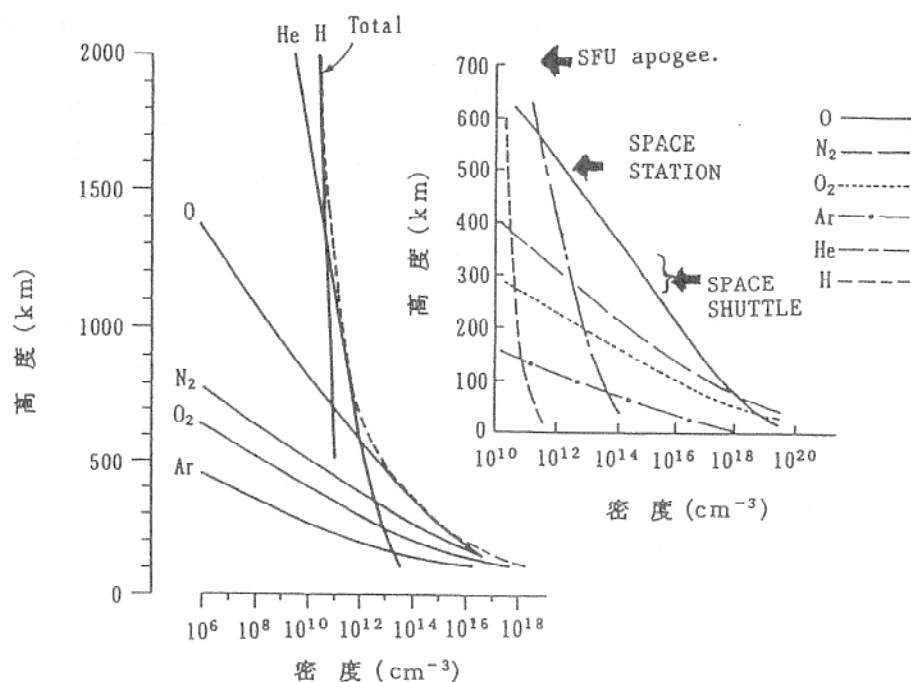


図1 宇宙環境の特質と薄膜創製技術

* Yoshihiro HAMAKAWA
1932年7月12日生
大阪大学大学院工学研究科博士課程電気工学専攻中退
現在、大阪大学基礎工学部、電気工学科、教授、工学博士、電気工学(半導体電子工学)
TEL 06-850-6315



** これに対して毛利さんのような宇宙実験担当者をPI (Payload Specialist) とよぶ。

図2 地上からの高度と大気中の分子の密度³⁾

がある。しかし乍ら、これまでスペースラボと称して実施されたテーマは全て微小重力環境を利用したもので、材料分野では、比重差の大きい合金の混合とか、地上での液体の挙動を支配する静水圧、沈降、自然対流が無重力下ではみられない点を利用した材料プロセッシング或いはマラゴニー対流など純粋の物理現象を観察するものなどに限られている¹⁾。

一方、宇宙空間が超高真空であることを積極的に利用した実験は、未だ実施された例がなく、これまでにMBGE (Molecular Beam Grapho-Epitaxy) による薄膜単結晶半導体の製造などが提案されているが²⁾、まだ実施されていない。この理由は、現在のスペースシャトルが周回する高度300～400kmでは、その真空度は 10^{-6} Torr. の程度でMBGE法で必要とされる 10^{-11} Torr. には不十分である。仮りに図1のWake***の利用を考えても高度1000km以上に達するフリーフライヤー (SFU) とか、36000kmの静止衛星が必要となるため現在は云わば時間待ちの状態である。

しかし乍ら、21世紀をめざした材料技術の

イノベーションと考えられている多層化薄膜デバイスやマイクロエレクトロニクスと云われる大面積法膜製造に必要な蒸着とか、スパッタリングそしてIBD (Ion Beam Deposition) には 10^{-6} Torr. で宇宙空間が充分利用できそうである。

半導体材料の製造という立場からいまいつの魅力点は、図2に示すように宇宙が地上と比べて酸素ならびに窒素の密度が桁程度少ないことである。つまり宇宙は酸素フリーな空間であることから、あらゆる元素の高純度精製には最適の場所と考えられ、しかも宇宙でのこの真空は“タダ”である。

このほか地上と比べて40%増の太陽エネルギー密度は、将来宇宙工場などの宇宙活動の熱および電気エネルギーの資源が“タダ”で手に入る。さらに“広大な空間”と“良好な視界”はこれまですでに宇宙望遠鏡などとして利用されてきているが、将来の宇宙工場の建設と各衛星間の通信がすべて無線光通信ネットワークを可能ならしめ、無人ロボットで稼動する宇宙工場のFA (Factory Automation) の実現が容易と考えられる。そして今一つの大きな魅力は、いまのところ工場を建てる土地代がタダであり、また無重力空間に浮ぶ各種建設資材は、自重に耐える必要がないため桁違いに建設費を安くで

*** Wakeは本来、船の航跡を意味し、気体の拡散速より速く運動する人工衛星の背後は、軌道上の真空より3桁程度高真空となる現象を云う。

表1 新素材創製の観点からみた宇宙利用のメリット

- 1) 超高真空：
 - 10^{-6} Torr (300km) $\Rightarrow 10^{-9}$ Torr (wake 利用)
 - 10^{-9} Torr (300km) $\Rightarrow 10^{-12}$ Torr (wake 利用)
 - 真空一貫プロセス，薄膜堆積に有利
- 2) 不純物の汚染がない：
 - 酸素フリー，窒素フリー空間，不純物精製にも有利
- 3) 冷却能力無限大のヒートシンク：
 - 吸収率 1 の黒体に囲まれている，と考えてよい
- 4) 微少重力場 ($10^{-3} \sim 10^{-5} g$)：
 - 比重差に関係なく混合ができる，熱対流がない。
- 5) 広大な空間：
 - 4) と関連して巨大構造の建設が容易，土地代タダ
- 6) 豊富な太陽エネルギー ($1.4kW/m^2$)：
 - 熱および電気エネルギーも燃料なしで手に入る
- 7) 良好な視界：
 - 光通信，マイクロ波通信制御システムのネットワーク

きる。表1にこれらのメリットをまとめて示す。

3. バルク結晶時代から多層化薄膜デバイス時代へのエボルーション

近年，超高真空技術と超高純度材料精製技術の進歩が相まって，さまざまな薄膜電子材料の製造が可能となってきた。一方，常に“より多くの情報を”“より早く”，“より微少エネルギー”で処理するデバイスの開発，つまり1ビット当りの情報処理費を安くするという情報処理をめぐる経済の大原理から，年を追うとともに半導体ICの集積密度は高まる一方である。たとえば，1970年にフォトリソグラフィーで最小加工精度 $10\mu m$ ，アクセス時間 $0.5\mu s$ の1k(キロ)ビットのDRAM(Dynamic Random Access Memory)が開発されて以来，1974年には4kビット，そして16k，64k，256k，1M(メガ)とおおよそ4年毎に4倍の割合で集積密度が増し，現在では4Mビットが市販の域にあり，16Mビットの量産化ラインが建設されようとしている。しかし乍ら半導体デバイス技術に見られるこうしたTechnological Evolutionは，近い将来加工精度がナノメーター領域となり，このままではせいぜい256G(ギガ)ビットが限界と考えられている。これがいわゆる“数の壁”である。同様にICの集積密度の増加による配線間の浮遊静電容量などが“速度の壁”となっ

て立ちほだかり，こうした技術の壁を破るブレークスルーとして三次元ICが提案されている。

つまりこれまでの平屋建ICから高層ビルディングIC構築への提案である。そしてこれの実現には，半導体材料のみならず金属から誘電体材料の薄膜製造技術とその界面物性の研究が鍵技術となる。すなわちトランジスタの発明以来，延々と続いてきた“巨大化単結晶時代から多層化薄膜デバイス時代”への“Technological Innovation”がみられつつある。こうした技術トレンドは，プラズマCVD(Chemical Vapor Deposition)とかMBGE(Molecular Beam Grapho-Epitaxy)などの大面積薄膜製造技術を通して，さらに新しい技術革新として“マクロエレクトロニクス”(大面積化電子デバイス)が誕生しようとしている。

例えば大面積平板ディスプレイとか大面積集積化太陽電池がそれである。そしてこうした技術指向とそのソーシャルニーズは，折しも人類が新しく拓いた宇宙環境の持つ超高真空，微小重力など，前節で述べた特質がシーズとなって適合できそうなのである。

4. 宇宙における新種アモルファス半導体の創製

宇宙実験は，課題研究の提案者達の他にロケットの打ち上げからその完成システム，そして訓練された搭乗員(PS)，など多くの研究者を動員して，いわばシステム工学の枠を結集して進められるものである。それだけに研究課題の選定にも実験内容の学術的価値や，その成果の有用性についても充分考慮されなければならない。今回の“ふわっと'92”についてはこうした課題選定の結果，22テーマの材料実験と12テーマのライフサイエンス実験が選定され，実行に移された。

筆者の担当した“宇宙におけるアモルファス半導体の創製”は，いわば半導体の機能を決める禁止帯幅ならびに電氣的，光電的物性定数を自由に設計できる“シンセティックマテリアル”の創製をめざしたものである。具体的な材料としてはIV族の珪素(Si)とV族の砒素(As)ならびにVI族のテルル(Te)を合金化する謂わゆるカルコゲナイドガラスである。この材料は

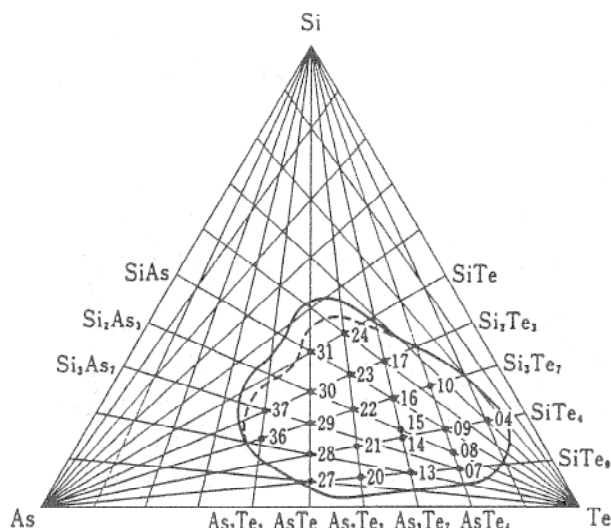


図3 Si-As-Te系アモルファス半導体のガラス化領域 (この領域外ではふつう3成分から成る固溶体が存在せず、多くの場合2成分元素から成る結晶が適当に混じり合った多結晶ができてしまう。またガラス化範囲は高温の熔融状態からの冷却の速さによって多少変化し、急冷するほど広がる。図中の実線は水中、破線は空气中に投入してクエンチした領域を示す。)

化学結合の腕が4, 3, 2配位で構成されているために図3に示すように特別に広いガラス化領域をもつため、各構成元素の混合割合によって連続的にその物性定数が製造可能なのである。実験方法の詳細は別の報告書にゆずる³⁾として、その結果のみを述べると、例えば禁止帯幅は、結晶ゲルマニウムに相当する0.6eVからICに使われているシリコン(1.1eV)、レーザーに使われているGaAs(1.43eV)、さらには発光ダイオードとして利用されているGaP(2.4eV)などに匹敵する物性定数をカバーし、一方、光センサで云えば可視光の全域から近赤外領域にわたる広い波長感度を持たせることが可能となり、オプトエレクトロニクス材料として広い応用範囲をカバーする基本的性質を保有する。

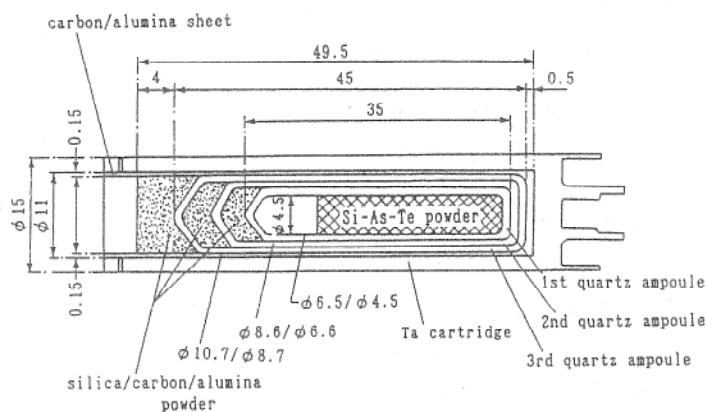
ところがこの材料は、表2に各構成元素の比重と融点を示すように、1,412℃という高融点で比重が2.33という軽いSiをそれより低い融

表2 Si-As-Te原材料の融点と比重

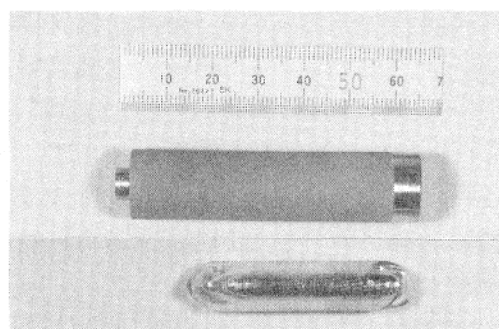
	Si	As	Te
融点(℃)	1412	817	449
密度(g/cm ³)	2.33	5.72	6.24

点で、しかも比重の重いTeやAsと混合して合金化されることから、三者の共晶温度1,100℃以上に加熱混合しても地上重力下では、二層分離が生じて到底、均質なアモルファス化ができない。事実、地上実験で得た試料は、示差熱分析の結果をみてもマイクロストレスが存在し、半導体の構造敏感性の指標ともいえる価電子制御性にも乏しい。筆者達のグループは、すでに1970年代初期にこの材料を開発し⁴⁾、一連の組織的研究を実施してきた⁵⁾。その結果、この材料がわれわれ半導体の研究者が長い間、夢と思っていた禁止帯幅、光吸収係数スペクトルならびに価電子制御が可能で、いわば設計可能な半導体(Synthetic Material)であることが判明した。“ふわっと'92”の実験結果は、無重力下であるため上記した二層分離もなく、ほぼ完全に均質な合金化に成功し、しかも価電子制御の実験結果は極く僅かの不純物で電気伝導度が7桁も変わる高いドーピング効率を得られた。

図4に宇宙実験で用いたサンプルとそのカードリッジを示す。“ふわっと'92”は言うまで



(a) 宇宙実験用カートリッジ内部の構成



(b) タンタルカートリッジおよび3重石英アンプルの外観

図4 スペースラボSL-J, ふわっと'92 M-13で行ったSi-As-Teアモルファス半導体の製造実験試料

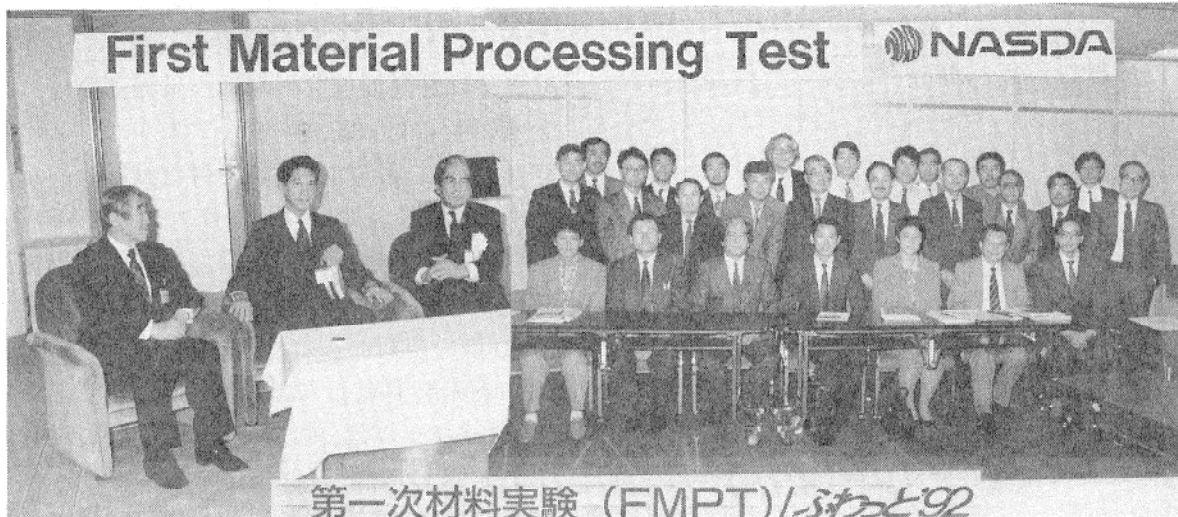


図5 “ふわっと'92” PS-PI ミーティングと記者会見

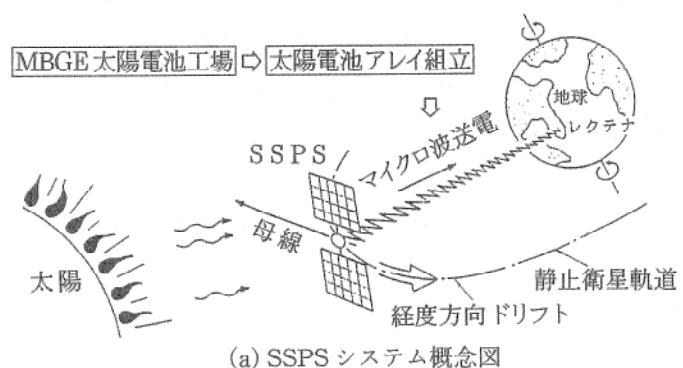
もなく有人スカイラボであるため、NASAの安全規則が厳しく、爆発の恐れとその有毒性のあるわれわれのサンプルは、3重の石英管に完全に真空封止され、更に、同図(a)に示すタンタルカートリッジに入れて1,300℃で60分加熱混合の後、ヘリウムガスの噴射によって急冷クエンチ処理を施こして調整された。図5は、実験成功後のPI-PSミーティングとその記者会見の様子を示したものである。

5. 宇宙における大面積太陽電池の製造とソーラーブリーダー

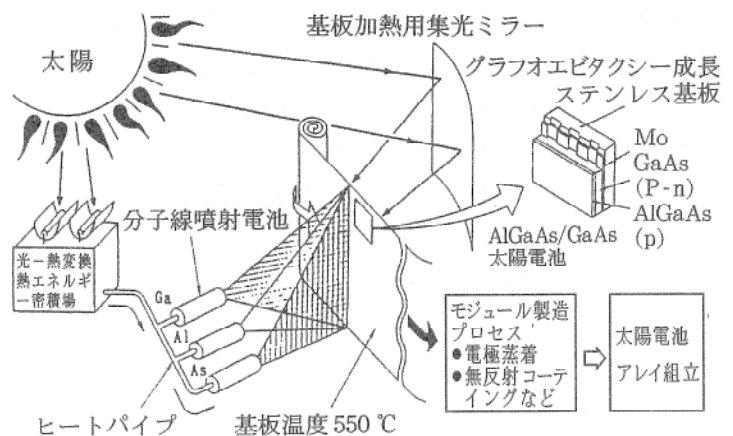
宇宙に数km四方の太陽電池を浮べて発電し、その電力をマイクロ波送電するという宇宙発電システム(SSPS)の概念は、P. E. Glaserによって1973年に提案され⁶⁾、米国ではこれを国家プロジェクトの一環として本気で取り組もうとした時代があった。1976年から数年間いろいろの要素技術の研究開発が進められてきた。そして現在は、貨物輸送用の超大型シャトルの開発が遅れているのと、1985年以来のデタントの影響に加えて、米国の赤字財政の事情もからんで宇宙開発予算が大幅に削減され、ここ10年、大きな進展が見られていない。

表1でも示したように宇宙では真空がただでしかも酸素フリーであり、地上よりもはるかに無機材料の不純物精製に有利である。さらに無重力空間であるため巨大な構造の宇宙

工場を作るとしても、構造物の自重に耐える必要がないので地上での工場建設と比べてはるかに安上がりでできる。さらに、土地代もタダである。また生産活動に必要なエネルギーは、太陽エネルギーの密度が地上の1.4倍、そして昼夜とか、お天気の影響がないため、地上と比べ



(a) SSPS システム概念図



(b) MBGE 用を用いた宇宙太陽電池工場の製造システム

図6 宇宙発電衛星 SSPS のシステム図 (a) および MBGE 法による大面積太陽電池工場の説明 (b)

