

NIMS

2010年 1-2月合併号

NOW

特集
NIMSのダイヤモンド研究
— 宝石から材料へ —





理事長
潮田 資勝



新年あいきつ

NIMSは材料研究に特化した研究開発型の独立行政法人として、これまで様々な成果をあげてまいりました。新しい年を迎えるにあたり、私たちは一層の努力をかたむけてこれまでの歩みをさらに進めていきたいと考えています。

第4期科学技術基本計画の実施を機に、政府は国の科学技術政策の姿勢をいわゆる出口指向に改めようとしています。いま、この地球上で、そして人類社会で、環境・エネルギー問題や食糧と水の不足など、緊急に解決しなければならない課題は山積しています。こうした課題を設定して、それらの解を求めるための研究開発を重点的にやっていこうという考えです。社会における研究開発の重要性を認識した結果であり、科学や技術が人類の将来に直接関わりあうようになった証拠ともいえましよう。

私たちはこうした考え方を真摯に受け止め、政策に沿った研究開発を実行しようと考えます。

その一つが、「ナノ材料科学環境拠点」の設立です。文部科学省の「ナノテク材料を活用した環境技術開発プログラム」に応じてつくられた拠点で、エネルギー・環境問題解決のために4つの課題(太陽光発電、光触媒、二次電池、燃料電池)を設定し、産業界や大学、独立行政法人から第一線の専門家を集め、基礎・基盤的な研究を徹底的に進めることによって課題を解決していこうというもので、そのホスト役をNIMSが果たすことになりました。

この拠点を大きく伸ばすことによって、私たちはCO₂の25%削減をうたった国の施策に、できるだけの貢献をしていきたいと考えています。

もう一つは、「国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA)」です。設立2年を経過し、著名な研究者のリクルート、外国人研究者の比率が半数を超え、英語の公用語化

を実現したことなど、国際化推進の成功によって現在高い評価を得ています。研究についても多くの成果があらわれつつあり、ナノアーキテクトニクスの概念を用いたナノテクノロジーの新しい方向づけをするための探索研究を行うと同時に、ナノシートや原子スイッチ、光触媒など、将来の応用に花開く研究成果を積み上げています。

MANAは、21世紀の持続可能な社会の実現に向けて革新的な材料を創り出していくことによって、設立10年後には世界トップレベルの研究拠点になることを目指しています。

英語力の一層の充実をはかるために全職員に研修を義務づけ、また、定年制職員の10%程度は常に外国に滞在している状態にしたいと考えています。

一人で海外に出て仕事をし、生活をする事は、国際人として成長するために極めて有効であるばかりでなく、外国での交友がNIMSに優秀な人材を連れてくるための足掛かりにもなります。特に若い人たちはほとんど外に出て行くべきです。その結果としてNIMSが優れた人材供給源になれるとすれば、それは我が国全体にとっても喜ばしいことでしょう。

地球規模のいくつかの課題に緊急の対処を迫られている現在の世界情勢の中で、日本が今後一流国として尊敬されていくためには、何よりも基礎科学と産業技術の優位性を保って世界的課題の解決に貢献することが肝要です。革新的な材料の研究開発を通じて我が国の技術の優位性確保に貢献することこそ、NIMSのもっとも大きな使命であると考えております。

Think-for-Yourself, Do-It-Yourselfをモットーに、私たちは大いに楽しんで日々研究を進めたいと思います。

本年も変わらぬご指導、ご支援をお願いし、皆さまの一層のご発展をお祈り申し上げて新年の挨拶とさせていただきます。

特集 NIMSのダイヤモンド研究 優れた特性の解明と革新的材料への応用



宝石から材料へ

NIMS名誉顧問 かもむつかず 加茂 睦和

ダイヤモンドは宝石の王様として誰にでも親しまれている物質ですが、科学技術の進歩により、物質としての様々な性質が解明されるにしたがって、材料として注目を集めるようになりました。超硬物質という特質を生かした工具材料、高熱伝導やワイドギャップ半導体としてのエレクトロニクス材料、生体親和物質としてのバイオ材料、最近では超伝導性も見出され、量子コンピューターへの応用も研究され始めています。

これらの応用の広がりには、簡便な合成法である気相

法の開発が大きく寄与しているといえます。

ダイヤモンドが炭素の一つの形態であることが分かって以来、多くの研究者が人工合成に挑戦してきました。はじめての成功は1950年代に欧米企業によって成し遂げられましたが、高圧発生装置の開発が主要なポイントでした。

1970年代に始まった旧無機材質研究所でのダイヤモンド高圧合成の研究も、高圧発生技術の研究開発に負っているところが極めて大きいのです。

ダイヤモンド研究のスタート

NIMSのダイヤモンド研究は、1969年にスタートした無機材質研究所(NIMSの前身)の炭素グループによる高温高圧法に始まります。炭素グループは1974年にダイヤモンド研究グループとして再編成され、高温高圧法による単結晶合成を中心に、衝撃圧縮法および気相合成法を探索的研究課題として取り上げました。

1979年までの5年間に、気相法については昇温脱離法による炭素材料の表面吸着、酸素によるダイヤモンドの黒鉛化、炭素の同位体を用いた気相からのダイヤモンド成長や各種炭素材料のラマン分光法による評価など、後にダイヤモンドの気相合成につながる基礎的研究を行いました。

気相合成の成功

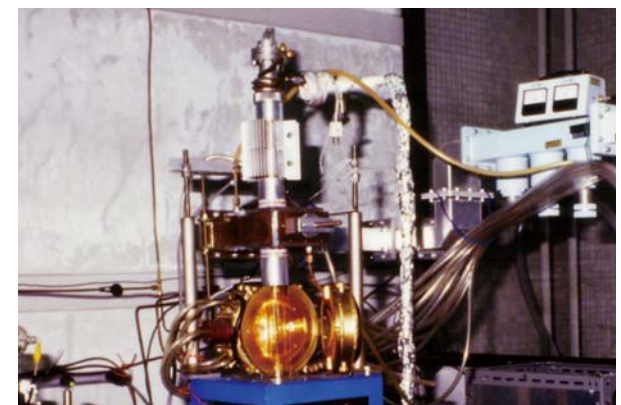
1979年からの第二期研究では、高温高圧法による焼結体の合成を中心

に、気相法に関する研究は、引き続き探索的な課題でした。

1981年出版の、前年モスクワで開催された結晶成長国際会議のプロシーディングスに、シリコンや銅など異種基板上へ析出したダイヤモンド粒子の写真や結晶面の合成温度依存性など、Spitsynらのダイヤモンド気相合成の驚くべき結果が報告されていました。

その論文には合成装置を含め合成法についての詳細な記述はありませんで

したが、研究グループの一人が原子状水素の記述に注目し、水素を2000℃近くまで加熱することで活性化させ、熱フィラメント法によるダイヤモンドの気相合成に成功したのです。研究を始めて7年半後の、開放型の装置を用いた気相合成の幕開けでした。引き続き、1982年にはマイクロ波プラズマ法、高周波プラズマ法によるダイヤモンド合成に成功し、気相合成法が一気に花開いたのです。



無機材質研究所で開発されたダイヤモンド気相合成用マイクロ波プラズマ装置

ダイヤモンド半導体と深紫外線センサ

センサ材料センター 光学センシング材料グループ グループリーダー 小出 康夫

当初、気相法で合成したダイヤモンドは、天然ダイヤモンドや高温高压法で合成されたダイヤモンドに比べて、純度や結晶性を反映する光学的性質でかなり劣っていましたが、合成条件の改善の結果、カソードルミネッセンスで励起子発光を観測するなど、気相合成ダイヤモンドが天然ダイヤモンドや高温高压ダイヤモンドと比べ品質としても決して劣らないことを後に確認することができました。

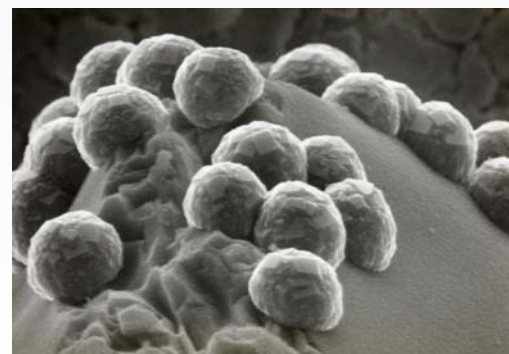
今後の応用への期待

無機材料研究所でのダイヤモンドの合成成功後、日本ではダイヤモンド研

究の取り組みが急激に増加しました。特に、合成法については、電子アシスト化学気相反応法(EACVD)、燃焼炎を使う方法、直流プラズマを使う方法、熱プラズマを用いる方法などが、次々と開発されました。様々な方法が開発されましたが、制御性や操作性から、現在ではマイクロ波を用いる方法が主流となっています。

気相合成ダイヤモンドは大きな市場ではありませんが、これまでに切削工具、スピーカー用振動板、耐摩耗摺動部材、放熱基板、表面

弾性波フィルターなどに実用化されています。無機材料研究所では1996年天然にはないn型半導体の合成にも成功しました。高性能電子デバイスの開発に期待が寄せられています。



マイクロ波プラズマ法で初めて合成されたダイヤモンド粒子

ダイヤモンドとエレクトロニクス

1982年以来、ダイヤモンドのエレクトロニクス分野への展開は、高品質単結晶薄膜成長法の確立、p型およびn型伝導制御法の確立、ダイヤモンド表面並びに金属および絶縁体/ダイヤモンド界面の物性理解を通して着実に進められてきました。筆者は1993年、p型ダイヤモンドの低抵抗なオーム性電極材料の開発から本分野に参加を始め、現在ではダイヤモンド薄膜の結晶成長からデバイス開発までに一貫して携わる研究者の一人です。

ここでは、これまでSi-UlSI(超大規模集積回路)プロセス、GaAs系集積回路プロセス、およびGaN系発光デバイスプロセスを通して得た経験と比較しながら、ダイヤモンドに特徴的な半導体デバイス物理を紹介いたします。

ディープドーパント効果

ダイヤモンドは室温でバンドギャップ5.5電子ボルトを持ち、Siと同様の多谷構造から成る間接遷移型のエネルギーバンド構造を持ちます。また、イオン結合性を持たない共有結合性のワイドギャップ半導体であるため、誘電率が小さく他のSiやIII-V族化合物半導体に比べて半分以下です。固体物理学の有効質量モデルによれば、小さな誘電率は、n型およびp型ドーパントのイオン化エネルギー(不純物準位)が大きくなることを予測させます。実験的にもドーパントのイオン化エネルギーが大きいので、室温において半導体デバイスとして駆動させるための十分な電子および正孔濃度を確保することが容易ではありません。

せん。実際、ダイヤモンド内の電子や正孔は残留不純物によって補償(キャリア消滅)されやすく、また電子・正孔が空間的に広がりやすい特徴があります。半導体中のドーパントであるアクセプタドナーのイオン化エネルギーが大きいことを特徴として現れる様々な電氣的・光学的特性を総称して「ディープドーパント効果」と名付けました。これは他の半導体と比べると欠点ではありますが、ダイヤモンドを用いた深紫外線(波長190~280nm、図1参照)のセンシングにおいては、ディープドーパント効果によ

って、極めて大きな光伝導利得現象が現れ、センサ感度が飛躍的に向上することが判明しました。

紫外線センサの開発

この大きな特徴を利用して、太陽光が存在する日中においても深紫外線のみを検知し、極めて熱安定および高感度で低電圧駆動する「太陽光ブライント紫外線センサ」の開発に成功するとともに、図2に示すようにダイヤモンド深紫外線センサを用いた火災検知システムの開発にも世界で初めて成功しています。

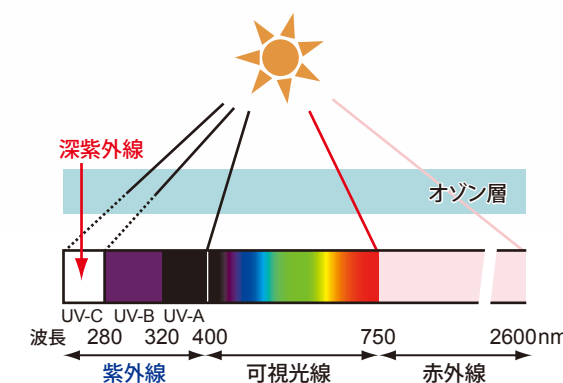


図1 地球上太陽光スペクトルと深紫外線センサの説明図



図2 ダイヤモンド太陽光ブライント紫外線センサを用いた火災検知システム

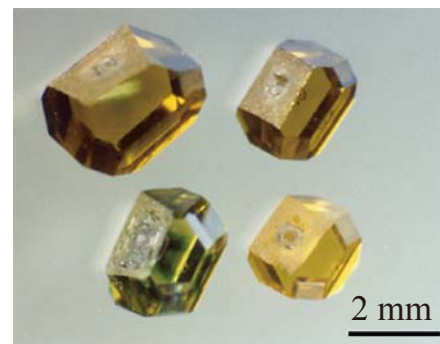
さまざまな高压合成ダイヤ

つくば科学万博記念財団/NIMSセンサ材料センター リサーチアドバイザー かんだ ひさお 神田 久生

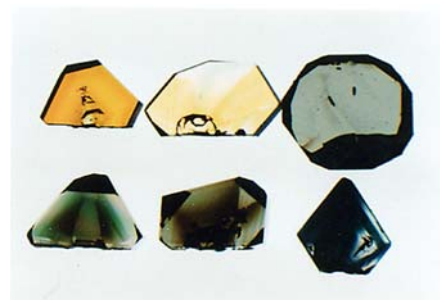
高压合成ダイヤモンドには多結晶と単結晶のものがあります。多結晶ダイヤモンドでは、コバルトなどの金属を助剤とした焼結ダイヤモンドの研究が行われていましたが、NIMSでは炭酸塩などの非金属触媒を発見し、それを用いた焼結体を開発しました。これは耐摩耗性に優れていて、切削工具の高性能化につながります。最近、愛媛大学で、触媒を使わないで黒鉛の直接転移による透明多結晶体が合成されました。これはさらに高い機械的特性が期待されます。多結晶ダイヤモンドの研究も進化が続いています。

単結晶ダイヤモンドでは、欧州の企業によって最高35カラット(径2センチ)の大型結晶も合成され、最近ではカラットサイズの結晶が宝石用として出回るようになってきました。NIMSでは、単結晶ダイヤモンドについて不純物制御を中心に研究を行いました。

ダイヤモンドの不純物としては窒素、ホウ素がよく知られていますが、その他、ニッケルやコバルトなどの金属元素も混入することが見いだされ、新規の着色ダイヤモンドが合成されました(写真)。最近ロシアで、ホウ素の高濃度ドーピングによってダイヤモンドが超伝導になることが発見され、大きな話題になりました。今後、新しい特性をもつダイヤモンドが出現することも期待されます。



高压合成ダイヤモンド。黄色、緑色はそれぞれ不純物窒素、ニッケルによる。



高压合成ダイヤモンドの研磨面。黄色は不純物窒素による。茶色、緑色はニッケル、青色はホウ素による。右上は不純物を含まない無色。

ダイヤモンド薄膜成長とpn接合デバイス

センサ材料センター 光学センシング材料グループ 小泉 聡

n型ダイヤモンドの合成研究

CVD法によってダイヤモンドの気相成長が可能となったことは画期的進歩でした。高压合成では困難であった薄膜成長が比較的容易にできるようになり、ハードコーティング、さらには電子デバイスへの積極的応用という新たな可能性が得られたからです。NIMSでは旧無機材質研究所時代からCVD法による高品質半導体ダイヤモンドの成長、特に自然界に存在しないn型ダイヤモンドの合成研究を積極的に進めてきました。

pn接合の形成に成功

n型ダイヤモンド合成実験では、これまであまり目を向けられなかった{111}結晶表面が電気的に活性なリン原子をドーピング(微量添加)するのに適していることを初めて発見しました。1997年に論文発表したn型ダイヤモンド合成の成功は、ダイヤモンド電

子デバイス実現のために不可欠な技術として大きく注目されました。この成功には、結晶欠陥が発生しやすい{111}結晶成長を高品質化するために見いだした特殊な合成条件が深く関係しています。得られたn型ダイヤモンドはドナーであるリンの活性化エネルギーが大きく高抵抗であるという問題点もありますが、電子に

よる電気伝導が可能な特殊なダイヤモンドです。これを利用し、我々はpn接合の形成に成功しました。ここではn型ダイヤモンドから電子が、p型ダイヤモンドから正孔が接合界面を通して双方に注入され、その再結合発光が観測されました。波長はダイヤモンドに固有の自由励起子再結合発光と同じ235nm(5.27電子ボルト)です。論文発表当時の2001年、発光ダイオードから得られた紫外線波長としては最短(最高のエネルギー)でした。

深紫外線のLEDとセンサー

現在、この研究は産総研エネルギー技術研究部門との共同研究として継続しており、pinデバイス(高純度ダイヤモンド発光層をpn接合ではさんだもの)で235nm深紫外線出力として100マイクロワットを発生するまでに至りました。図1は、上側が私たちが最初に報告したLED、下が最新のLEDの発光の様子です。残念ながら写真で見える光は結晶欠陥に伴う可視光発光で、肝心の紫外線部分は写っていませんが、最

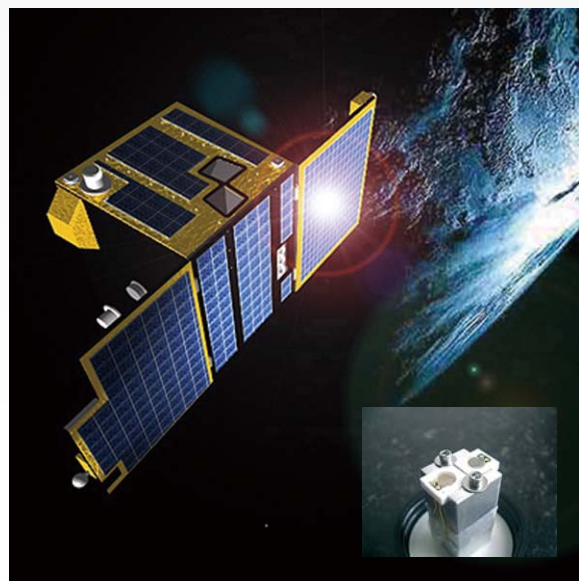


図2 センサーチップと搭載されるPROBA II型太陽光観測衛星

新のLEDでは可視光領域よりも強い積分強度で深紫外線発光が得られています。pn接合による発光の過程を逆にすると光を電気に変換する光電変換素子、光センサーができます。ダイヤモンドの5.47電子ボルトの幅広いバンドギャップにより、225nmよりも短い紫外線を検出する深紫外線センサーとして良好な動作が確認されました。

太陽光観測衛星に搭載

LEDと同様に、pinデバイスをダイヤモンドとしては大きな5mmのディスク状ダイヤモンド基板表面に形成したセンサーチップは、その高い安定性が評価され欧州宇宙機関のプロジェクトに採用されました。図2に示したのがセンサーチップとこれが搭載されるPROBA II型太陽光観測衛星です。これらの研究と並行して、今後我々はpn接合デバイスを電子エミッター、パワーデバイスなどに応用するべく研究を続けます。ゲルマニウム、シリコン、SiC、GaNと発展する半導体デバイスの先にあるのが究極のダイヤモンドデバイスであると考えています。

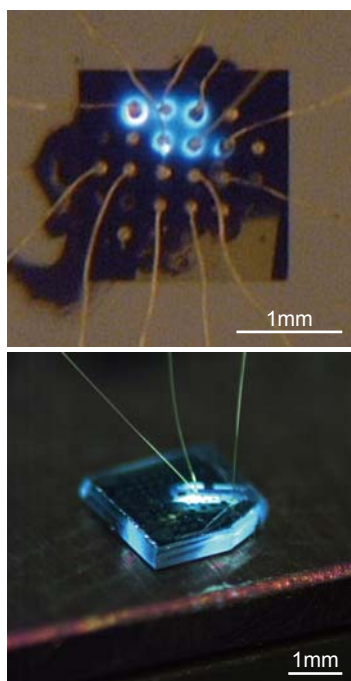


図1 (上)最初に報告したLED、(下)最新のLEDの発光の様子

ダイヤモンドショットキーダイオードの開発

センサ材料センター 光学センシング材料グループ 寺地 徳之

省エネにつながるダイヤモンドダイオード

一次エネルギーに占める電力の割合が高まり、また従来の大規模発電に加えて分散型発電が導入される中、小型・高変換効率の電力制御素子の開発が望まれています。ダイヤモンドは絶縁破壊電界がSiの30倍、SiCの3倍と極めて大きい事が特徴で、ダイヤモンドでダイオードを作製すれば、素子の小型化と低消費電力化を同時に実現できます。ダイヤモンドの熱伝導率は半導体材料中最大であり、駆動時の発生熱に対しては自らが放熱板として働きます。さらにダイヤモンドは、Siの5倍に相当するワイドギャップ半導体のため、高温動作や大電流制御が可能な点が、ダイヤモンドダイオードの特長です。ダイヤモンドを基材とした超低損失パワーダイオードの開発は、省エネ・地球環境保全に繋がる研究として期待されています。

ショットキーダイオードの作製

真空紫外線とオゾンを使った、新開発

の表面処理法を用いて、ダイヤモンドショットキーダイオードを作製しました。ダイオード特性を評価(図1)したところ、耐圧1kV以上、逆方向漏れ電流30pA以下($\sim 10^{-7} \text{A/cm}^2$)という良好な結果を得ました。

高温で発揮する高性能

動作特性(図2)については、-120℃から300℃の広い温度範囲で、特性劣化する事なく、良好に動作する事が分かりました。開発が進んでいるSiCショットキーダイオードでは、250℃での安定動作が報告されていますが、今回試作したダイオードは、ダイヤモンドに金属を蒸着しただけの簡単な構造であるにもかかわらず、300℃でも高い安定性を示しています。今後、素子構造を改善することで、さらに優れた高温動作特性が得られると考えています。

図2では、室温時に比べ300℃の順方向飽和電流密度(例えば、電圧3V)が大きい事に気がつきます。

SiCを含めた既存の研究材料では、

昇温とともに飽和電流密度は低下、即ちデバイス動作時抵抗が増加します。主に結晶中のキャリア移動度の低下が飽和抵抗を上げる原因となっているのですが、ダイヤモンドではこの温度領域でキャリア濃度が増加し続けるため、抵抗率は300℃付近が最も小さくなるのです。このような事からも、ダイヤモンドショットキーダイオードは、300℃付近での高温動作特性に優れていると言えます。

高温安定性の一層の改善

ダイオードの温度を600℃まで上げると、ダイオード特性は良好ではあるのですが、変化が見られました。この変化はダイヤモンド自体の問題ではなく、金属とダイヤモンドの界面が変性した事に起因している事が分かっています。熱的安定性に優れた界面形成法を確立することで、ダイオードの高温安定性がさらに改善すると考えています。



図1 ダイオード特性の評価実験

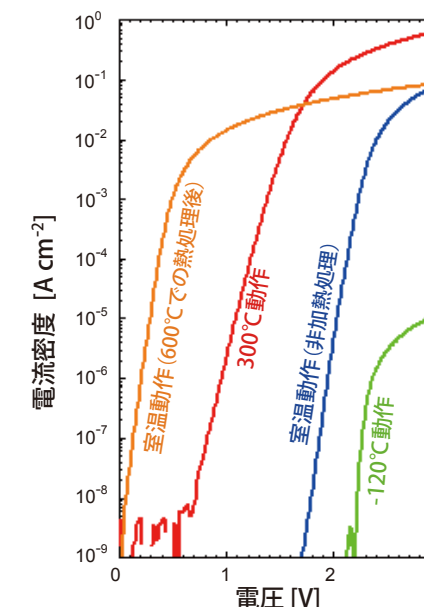


図2 ダイヤモンドダイオードの動作特性

ダイヤモンドの超伝導

超伝導材料センター ナノフロンティア材料グループ グループリーダー 高野 義彦

はじめに

純粋なダイヤモンドは、いかなるものよりも硬く、透明で美しく、熱をよく通しますが、電気は流さない絶縁体です。金属のように電気を流すことができるダイヤモンドがあると聞いたなら驚く人も多いでしょう。しかも低温では、全く電気抵抗のない超伝導状態で電気を流せる、実は、そんな不思議なダイヤモンドが合成できます。

ダイヤモンドの性質を ホウ素で制御

ダイヤモンドは炭素原子が共有結合してできています。美しい天然宝石のダイヤモンドは、一見、純粋なものようですが、実際にはホウ素や窒素などの不純物を含有しています。それでは、人工的に大量のホウ素をドーピングさせたダイヤモンドを合成したらどうなるのでしょうか。

ホウ素は炭素に比べ電子が一つ少ないので、ダイヤモンドを形成する炭

素原子一つをホウ素原子に置き換えると、電子が一つ少ない状態が生まれま

す。これをホール又は正孔(+のキャリア)と呼びます。図1に様々なホウ素濃度を持つダイヤモンドの電気抵抗を示します。ホウ素が少しドーピングされたダイヤモンドは半導体的性質を示し、ホウ素濃度が $3 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ を超えるとダイヤモンドは金属的性質を示します。

ジョセフソン素子の開発

このように、ダイヤモンドはホウ素濃度をコントロールするだけで、絶縁体、半導体、金属、そして超伝導と、特性を大きく制御することができるのです。

私たちはこの特徴を使って、ダイヤモンドのみで作られたジョセフソン素子を

開発しました。図2に作製した素子の略図を示します。単結晶ダイヤモンド基板上に、超伝導ダイヤモンド薄膜、非常に薄い半導体薄膜、再び超伝導薄膜を、ホウ素濃度を制御しながら順に成膜しました。この半導体層は、ホウ素濃度が金属絶縁体転移濃度より低くなるように調整してあります。ジョセフソン素子は、半導体のトランジスタに対応する超伝導における基本的な素子で、磁束センサや電圧標準、超伝導コンピューターなど様々な応用が可能です。

ダイヤモンドで新しい素子を

一般に、LSI等を作成する際、性質の異なる金属や絶縁体は別の物質を用いるために、積層させるときに、整合性や相性が問題になります。基板から薄膜まで全てが単結晶ダイヤモンドで作られた素子は整合性が大変すぐれています。さらに、ダイヤモンドは物理的にも化学的にも安定で熱伝導がとてもいいので、理想的な素子が作製可能なのです。私たちは、このようなダイヤモンドの特長を生かした新しい素子を開発しています。

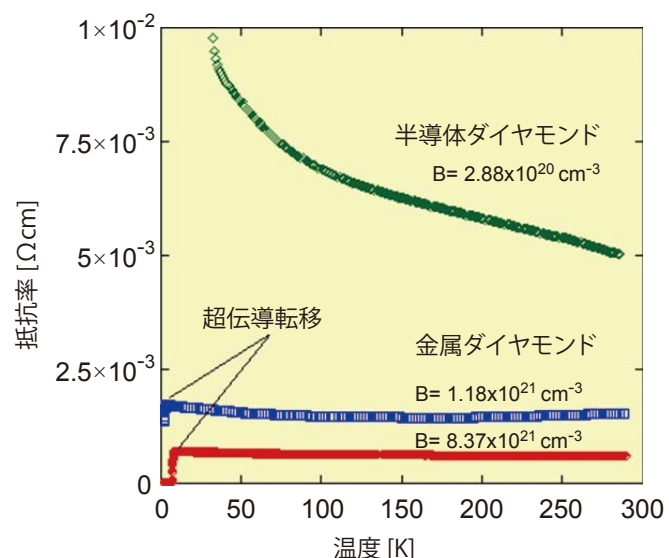


図1 ホウ素ドーピングダイヤモンドの金属絶縁体転移と超伝導転移

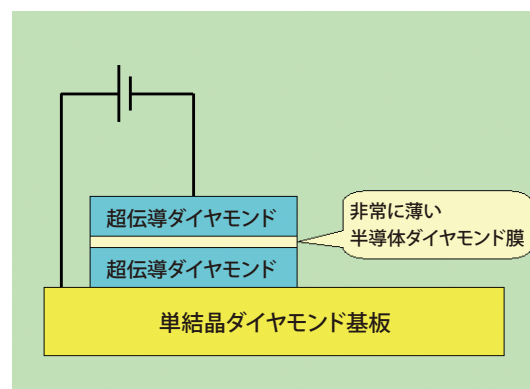


図2 ダイヤモンドのみで作られたジョセフソン素子の略図

フェイス interview

昨年、アメリカ材料学会(ASM International, 以下ASM)のフェローに指名された黒田センター長は、金属微粒子などによる基材のコーティングを20年以上にわたり研究してきました。製造機械やエンジン部品などに広く利用されるコーティングは、黒田センター長らの仕事によって、経験先行の世界からサイエンスに裏付けられた技術へと進化しています。



ハイブリッド材料センター
センター長 黒田 聖治 (Seiji Kuroda)

コーティングを 経験知からサイエンスに

ASMフェローの栄誉、おめでとうございます。

ありがとうございます。ASMは金属など材料の科学と工学の学会で、20世紀初頭に金属技術者が情報交換と技術の普及を目的に集まったのが発端です。昨年10月にピッツバーグで、私にとっては少々晴れがましい授賞式がありました。

大学院では計測を専攻されたのに、なぜ金属材料研究所(NIMSの前身、以下金材研)に入られたのですか。

指導教授から「測定する対象は自分で探せ」と常々言われ、金材研でプラズマ溶射研究室を立ち上げた蓮井淳先生を紹介されました。見学すると、応用範囲が広くおもしろそう。溶射(コーティング)はガスやプラズマの炎の中で金属などの微粒子を溶かし高速で基材に打ち付けて膜を作る技術ですが、条件によって膜の品質が違い、その理由が不明でした。成膜中の粒子速度や膜厚も正確に把握されていなかったのです。それを測定してほしいと言われ、自分の興味と一致したので、1985年に入所しました。当時は企業が盛んに中央研究所を作って、材料の基礎研究までやる勢いでしたから、それなら金材研では実際にプロセス中で何が起きているのかをじっくり研究しようと、必要な研究者を求めていたわけです。最初は用語もちんぷんかんぷんで、初歩的な質問ばかりしたものです。

溶射コーティングはどんなところに使われますか。

例えば関門海峡大橋には塩分による腐食防止のため、鉄鋼基材の下地に亜鉛の溶射コーティングが施されています。高速道路の橋梁など広い面積に施すにはロボットが活躍します。また、高温に曝されるジェットエンジンの羽根はセラミックスコーティングで、製造工場や発電所などの心臓部を厳しい環境から保護し、耐久性を高めるのに広く使われます。宇宙用機材にも使うほか、生体材料など機能材料にも可能性があるでしょう。数百 μm ~mm程度と塗装やメッキより厚く寿命が長いのが特長です。粉体を積み重ねるので、若干の隙間が生じます。そうした欠陥をなくすプロセスの開発も大切です。プロセス内部の途中経過を調べる方法と新たなプロセスの開発を今回評価していただ

いたと思っています。

基材や膜材料にはどんなものが使われるのですか。

基材は、金属、プラスチック、セラミックス、紙と何でも。膜材料は、金属、セラミックス、高分子、これらの複合材料などです。1万 $^{\circ}\text{C}$ 以上の電気炎で飛ばすプラズマ溶射、ガス炎を使う方法、ヒーターで加熱する方法など動作温度や方法も多様です。粒子の径を小さくすれば基材に熱の影響がなく、粒子速度を大きくすれば低温でも基材表面に結合するので、従来不可能だったものを付けることができます。

どうやってサイエンスにしていっていったのですか。

膜形成中に基材に働く応力を測定する装置を作り、力がどう溜まるか世界ではじめて連続的に測る方法を開発しました。応力は付き易さや剥がれ易さと密接な関係があります。そのメカニズムを解明し、予測が可能になりました。この仕事を引き継いで米国の大学発のベンチャー企業が冷却時の応力曲線や膜特性の計算ソフトを作り上げつつあります。温度や粒子速度がわかるツールもできています。また、最近の研究で、付くメカニズムがようやくわかってきました。イオンビームで切断して電子顕微鏡で観察すると、部位による付き方の差も見えます。

今後の夢は何ですか。

表面工学の総合的な研究開発拠点を作るのが夢です。コーティングは環境問題が厳しさを増す中、活用の幅が広い技術です。宇宙や原子力など異なる環境に必要な材料の鍵となる技術でもあります。幅広い分野の協力で新規プロセスや優れた膜、よく付く技術、診断法などを開発したいですね。NIMSには関連分野の専門家が大量にいて、研究の潜在力が大きいのです。

若い研究者に是非ひとことお願いします。

若い時に自分の専門とは違う分野に飛び込んでみるのもおもしろいですよ。独自の研究をするよい機会です。伝統ある研究分野に敬意を払うことも大切ですが、恐れずに異分野に挑戦してほしいです。

安全で使いやすい 遠紫外発光素子

—六方晶窒化ホウ素の実用化—

光材料センター 光電機能グループ

ナノスケール物質萌芽ラボ 超高压グループ*
(光材料センター 光電機能グループ兼任)

現在、遠紫外光領域(波長:280から198 nm)の光源は、光触媒による環境汚染物質の分解処理や、病院や食品加工現場などで用いられる紫外光殺菌などに広く使われています。しかし、水銀ランプなどの従来型放電ランプ光源には大きな電源装置が必要であり、また、ランプ内部に水銀などの有害物質を含むため使用や廃棄に細心の注意が必要で、非常に取り扱いにくいという欠点があります。

私たちは、2004年に六方晶窒化ホウ素(h-BN)の高輝度遠紫外発光特性を発見し、h-BNを発光源とする安全な紫外発光素子の開発を進めてきました。h-BNは化学的・熱的に安定であることから耐熱・絶縁材料などに一般的に使われており、古くからよく知られている無害な物質ですが、遠紫外領域における発光特性は、それまで明らかにされていませんでした。

今回、私たちと双葉電子工業(株)開発研究所は、実用レベルの安定出力0.2 mWを持つ平面型単色遠紫外発光素子の試作に世界で初めて成功しました。本素子の基本原理はFED(フィールド・エミッタ・ディスプレイ)と同じです。電界放出型電子源からの電子線を高電圧で加速し遠紫外蛍光体であるh-BN単結

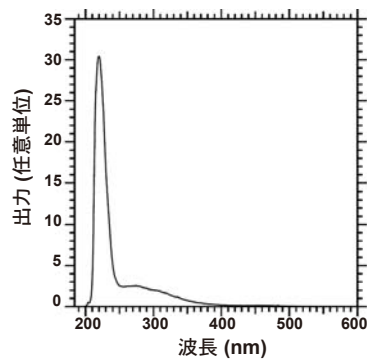
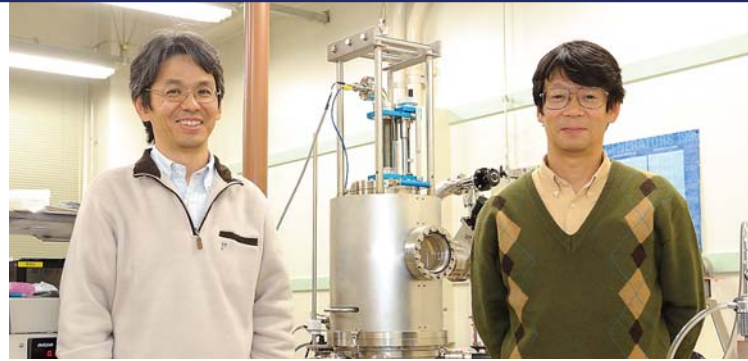


図1 出力スペクトルは、220 nm近辺の強い紫外光成分と弱い裾(250~400 nm)からなる。



渡邊 賢司

グループリーダー
谷口 尚*

晶粒子を励起し発光させます。光出力のほとんどが220 nm近辺の波長成分であり、熱の原因となる赤外線は出力されません(図1)。また、平面型の光源であることで、従来光源と比べ簡単に対象物への均一光照射が可能です。

本素子は動作電流が小さいので、乾電池で動作させることができます(図2)。直列接続の単三電池4本から得られる電圧を昇圧し素子を駆動することにより、大きな電源装置を使用することなく数時間にわたる安定動作が可能です。このように本素子は取り扱いやすく、従来光源では使用が制限されていた領域において新しい応用分野を開拓するものと期待されます。

昨今、欧州連合でのRoHS指令*に例を見るように、環境負荷の少ない水銀不使用の紫外発光デバイスへの期待はますます高まっています。このような社会的要請を受け、本試作素子のさらなる高性能化に挑戦していきたいと考えています。

*RoHS指令: 欧州連合が2006年に施行した電子電気機器に含まれる有害物質の規制で水銀などの6物質が規制される。

[参考文献]

K. Watanabe他, Nature Materials 3, 404 (2004).

K. Watanabe他, Nature Photonics, 3, 591 (2009).



図2 乾電池駆動遠紫外光源: 拡大図は試作発光素子を示す。矢印で示した青い線が光出力部分。強力な遠紫外光とともに放出される弱い可視光成分(400nm)が青白く見えている。

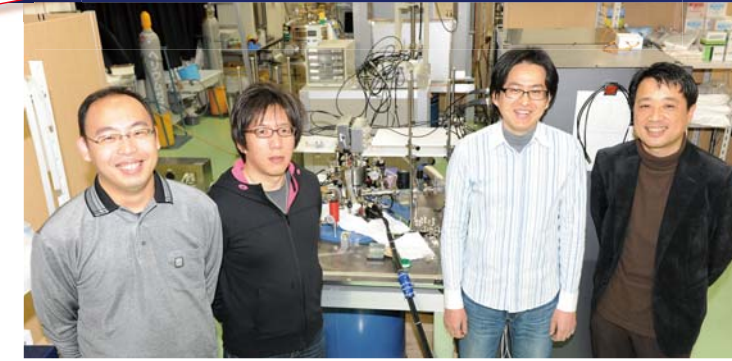
グラフェンで作る 量子デバイス

—結合量子ドット素子—

MANA独立研究者

ナノテクノロジー融合センター*1

ナノスケール物質萌芽ラボ ナノ量子輸送グループ*2



森山 悟士 津谷 大樹*1 渡辺 英一郎*1 宇治 進也*2

鉛筆の芯の材料などで非常に身近な物質であるグラファイトは、炭素原子が蜂の巣状に並んだ原子層一層のシート(グラフェン)が積み重なった層状物質です。近年、一層から数層のグラフェンシートは、室温で高い電子移動度を持つことなどが明らかになり、新しい電子デバイス材料として非常に注目されています。現在、グラフェンシートの大量作製や集積化可能なナノデバイスに関する研究が活発に行われています。

今回、私たちはグラフェンをナノ微細加工することによって、量子ドットを2つ結合させた、2重結合量子ドット素子を作製しました。量子ドットは、微小な空間に電子を閉じ込めて離散化されたエネルギー状態を持つ構造です。そして量子ドットを2個近接させて電子が静電的またはトンネル的に結合したものを結合量子ドットと呼びます。量子ドット内の電子数、量子ドット間の結合状態等は、電圧等で人工的に制御することが可能で、新機能エレクトロニクスの基本素子への応用が期待されています。

実験に用いられた素子は、超微細加工技術により全て一枚のグラフェンシート(三層グラフェン、厚さはおよそ1 nm)上に作製されました。図1(a)の点線で囲

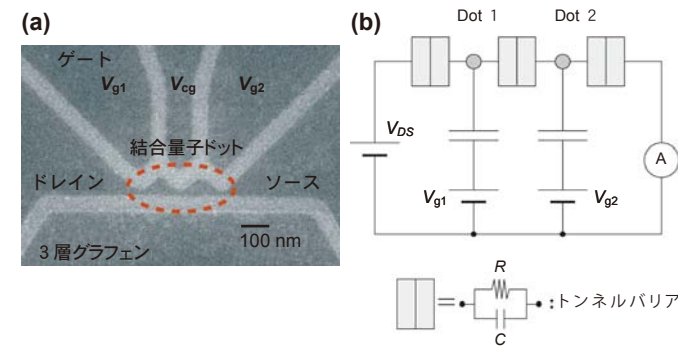


図1 (a) グラフェン結合量子ドット素子構造の電子顕微鏡写真。濃い灰色の部分が三層グラフェンシートで、薄い灰色の部分がナノ微細加工プロセスによってグラフェンシートを削り取った部分。(b) 素子の等価回路図。

まれた三角形の部分が量子ドットに相当し、2つ直列につながっています。2つの量子ドットは非常に微小な領域(量子ドットと電極をつないでいるくびれの部分)を介して量子ドットに電流を流すための電極(ソース・ドレイン電極)部分のグラフェンシートにつながっています。2つのゲート電極 (V_{g1} , V_{g2}) から、様々な電圧を印加すると、図2のように、ある決まった電圧の時にのみ、電流が流れることを見出しました。これは、 V_{g1} , V_{g2} の電圧を独立して変えることによって電子の流れを調整し、2つの量子ドットの電子数を1個単位で制御できていることを意味します。さらに量子ドット間の結合の強さをゲート電圧によって調整できることも確認し、結合量子ドットとしてのデバイス動作の実証に成功しました。

本研究によって新カーボン材料による集積化ナノデバイス開発の可能性が示されたことから、グラフェン材料を用いた、新機能ナノエレクトロニクスのデバイス開発の進展につながると期待できます。

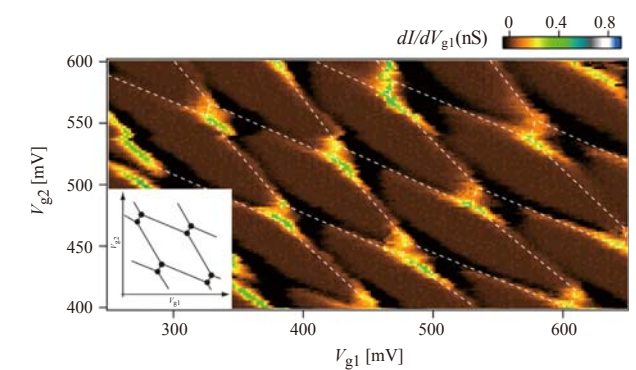


図2 2つの量子ドットに接続されたゲート電圧 V_{g1} , V_{g2} を変化した時の電子の流れを示した図。茶色の部分では電流が流れず、黄色~緑色の部分でのみ電流が流れており、白い点線で示す六角形の規則的な周期を持っている。左下の図はその模式図。解析によって、この2つの量子ドットが結合量子ドットとして動作していることが示された。

(S. Moriyama et al., Nano Letters 2009, 9, 2891-2896.)

川端文部科学大臣がつくばの研究所をご視察

平成21年12月2日、川端達夫文部科学大臣がNIMSの千現地区を来訪され、最近の研究成果の中から、サイアロン蛍光体の白色LEDへの応用や、航空機の燃費を高めるためロールス・ロイスと連携して開発を進めているジェットエンジンのタービンブレード用ニッケル合金の実用化、次世代太陽電池材料の開発に関する研究の現場をご視察されました。

川端大臣は、材料研究は地味だが科学技術において重要であり、今回の視察で環境に関わる研究について理解を深めた、NIMSが国内だけでなく外国企業と連携して行う研究は、例えば医療研究は日本のためだけでなく世界のために行うもので、世界の研究者がそこで研究したいという環境作りも大事だと述べられました。



超耐熱材料の研究現場で超合金の説明をお聞きになる川端大臣

ナノ材料科学環境拠点を設置

平成21年11月30日、NIMSにナノ材料科学環境拠点を設置しました。

太陽光発電、光触媒、二次電池、燃料電池をターゲットに、表面・界面における現象の高精度な理論解析と、表面・界面のナノ構造と反応を動的に観察する先端的な計測技術を融合し、環境エネルギー問題を解決する新材料の基礎研究・基盤的研究開発を、産学独が連携して行うことを目的としています。

この研究拠点は、文部科学省が行うナノテクノロジーを活用した環境技術開発プログラムにより、国内外の一流の研究者を結集して環境技術の基礎基盤研究開発を推進するために構築されるもので、NIMSがホスト機関に選ばれました。前述の4つのターゲットについて、太陽光から出発するエネルギー利用の共通の課題である高効率化、安全性の確保などを計算科学技術、先端的な計測技術を融合することにより解決し、環境とエネルギーを安定的に確保するための研究を行います。

米国ノースウエスタン大学と包括的研究協力協定を締結

NIMSは米国のノースウエスタン大学(NU)と3次元組織解析、半導体ナノワイヤで展開されてきた両者の協力関係を、さらに新しい分野での協力や人的交流へと発展させるための包括的研究協力に合意し、平成21年12月10日、NUの材料研究所長ロバート・チャン教授がNIMSを訪問されたのを機に調印を行いました。当大学の材料科学工学科は世界で最初に設立され、近年全米3位以内を維持しており、今後、太陽電池、形状記憶材料、軽合金、ナノマテリアルの分野においても著名な教授らとの共同研究、人的交流が期待されます。



ロバート・チャン教授(右から3人目)、NU出身の研究者を交えて

第9回 NIMSフォーラム、 第8回 ナノテクノロジー総合シンポジウムを開催します

東京国際展示場(東京ビッグサイト)において、2月17日(水)に"社会ニーズに応える物質・材料研究"をテーマに『NIMSフォーラム 物質・材料の最先端研究と技術移転』を、2月19日(金)に"ナノテクノロジーのエネルギーと環境への挑戦"をテーマに『ナノテクノロジー総合シンポジウム(JAPAN NANO 2010)』を開催します。

どちらも nano tech 2010(国際ナノテクノロジー総合展・技術会議)の期間中です。是非ご来場ください。

プログラム、参加の申し込みはホームページをご覧ください。当日会場での受付もいたします。参加は無料です。

NIMSフォーラム <http://www.nims.go.jp/nimsforum>

JAPAN NANO 2010 <http://nanonet.mext.go.jp/japannano/2010/>

お詫びと訂正：前号(NIMS NOW 2009. Vol.9 No.10 12月号)のP.3「量子ビーム研究開発のための機関連携」の図において、SPring-8 全景の中のNIMS専用ビームラインBL15XUの位置に誤りがありました。正しい位置はNIMSホームページのNIMS NOW (http://www.nims.go.jp/publicity/nimsnow/vol09/vol09_10.html)をご覧ください。