

# 両面アノードティックボンディングによるアレイ型マイクロセルの開発

## Development of array type micro cell using double-sided anodic bonding

○野崎孝弘\*, 加賀谷祐輔\*, 千葉寿\*, 大坊真洋\*

○Takahiro Nozaki\*, Yusuke Kagaya\*, Hisashi Chiba\*, Masahiro Daibo\*

\*岩手大学

\*Iwate University

キーワード：アノードティックボンディング (anodic bonding), RIE (Reactive Ion Etching), セル (Cell) カリウム (potassium), 原子磁力計 (atomic magnetometer)

連絡先：〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5 岩手大学 工学部 電気電子・情報システム工学科 大坊研究室  
大坊真洋, Tel : 019-621-6983, E-mail: daibo@iwate-u.ac.jp

### 1. 序論

磁場計測は、対象物を非破壊・非接触で検査できる。そのため、医療・産業分野を中心に応用化されている。現在、微弱磁場計測において原子磁力計の研究が進められている。超伝導技術に匹敵する程の高感度でありながら、冷媒が不要となるため、装置の簡略化が可能でメンテナンスが容易になるためである。原子磁力計はセルと呼ばれる容器にアルカリ金属原子(カリウム)が封入されており、磁場によるカリウムの傾きを検出する。近年はセルの小型化が進められており<sup>1, 2)</sup>、アレイ化すれば磁場の画像化も可能となると考えられる。本稿では反応性イオンエッチング (RIE : Reactive Ion Etching) によるシリコン加工と、シリコンとガラスに化学的な結合をさせるアノードティックボンディング (anodic bonding, 以下 AB と略す) を利用した、カリウム封止セルの製作方法について述べる。

### 2. 原子磁力計の動作原理

蒸気化したカリウムに、円偏光のレーザー光を照射するとカリウム原子が励起される。この時、光子のスピンの電子に遷移することで電子のスピンの揃った状態となる (スピン偏極)。スピン偏極したカリウムは、磁場によってスピンの向きが傾く性質があるため、カリウムが磁場の影響を受ける前後では、光の吸収度や直線偏光の偏光面に変化が現れる。原子磁力計は、これらの変化を検出することによって磁場計測を行っている<sup>3)</sup>。システムを構成する要素は、セル、セルの加熱機構、レーザー、磁場検出器のみであるため、装置の小型化が可能である。

### 3. セルの構造

シリコン基板を RIE により、貫通する穴あけ加工を行う。そして、レーザーの透過窓となるガ

ラスでキャビティを両面から封止した構造とする。これより、RIEによるシリコンの加工方法と、ABによる両面ボンディングの方法について述べる。

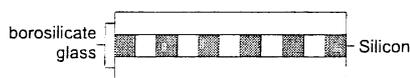


Fig. 1 アレイ型マイクロセルの断面図

## 4. 微細加工シリコンの製法

基板には RIE 加工のしやすさ、カリウムに対する耐食性、ガラスとの接合性を考慮し、シリコン基板 (10×10×0.5 mm) を使用した。シリコン裏側に Wet 酸化による酸化膜を形成し、過度なエッチングを抑えるエッチストップとした。表側よりレジスト塗布、フォトマスク上からの密着露光、現像工程を行い、RIEにより基板を貫通する穴あけ加工を行った。サイドエッチの影響があったものの、穴の入口が直径 700 μm、出口が 1200 μm の 5×5 個の貫通孔をあけた。

同様に、穴の入口が直径約 200 μm の微細加工シリコンも製作した。このシリコンは、カリウムを蒸着する時のマスクとなる。外観写真を Fig 2 に示す。

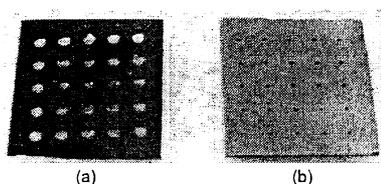


Fig. 2 RIEによる微細加工シリコンの外観写真 (a) セルのキャビティ用シリコン, (b) カリウム蒸着時に使用するマスク用シリコン

## 5. アノーディックボンディング

### 5.1 基板洗浄

AB を行う前に、基板を洗浄する必要がある。シリコン基板は、RCA 洗浄と呼ばれる半導体基

板用の洗浄方法を使用している。硫酸と過酸化水素水の混合溶液で、ウェハに付着した有機物を強力な酸化力により除去する。次に、水酸化アンモニウムをベースとした RCA1 と呼ばれる溶液で、シリコン表面の酸化膜を除去することにより、有機物やパーティクルをリフトオフする。最後に、塩酸をベースとした RCA2 と呼ばれる溶液で重金属を溶解して除去する。すべての工程を超音波洗浄で 10 分間行い、各工程間は純水ですすいでいる。ガラス基板は、アセトンによる超音波洗浄を 10 分間行う。

### 5.2 原理

AB では、ガラス中のナトリウムイオンを移動しやすくするために高温にする必要がある。高温にした状態で、ガラスをカソード、シリコンをアノードとし、高電圧を印加する。そのようにすると、ナトリウムイオンの移動により、シリコンとガラスの界面には静電引力が生じる。その後、ケイ素と酸素からなるシロキサン結合 (Si-O-Si) が形成され強固な結合が得られる<sup>4)</sup>。

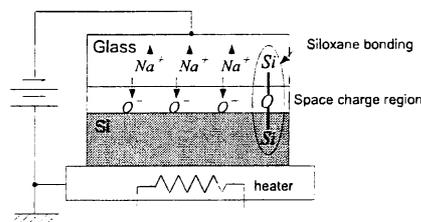


Fig. 3 アノーディックボンディング原理図

一般に、AB の進行は、ボンディング時の電流の減少により判断できる。イオンの移動量が多い電圧印加直後に最大値を示す。そして、結合の進行と共に減少し、安定化する<sup>4)</sup>。図 4 は、基板温度をそれぞれ 230 °C と 320 °C に設定した時の、AD 時の電流変化である。図 4 より、高温の方が最大電流値が大きく、結合にかかる時間も短いことから、AB は高温状態が適していることが分かった。この結果により、セル製作時の ad は約 300 °C で行うこととした。

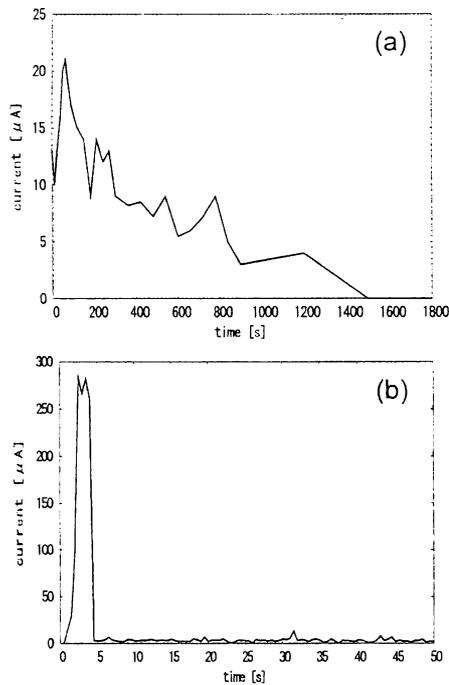


Fig. 4 アノードックボンディングの低温と高温の時の電流変化 (a) 設定温度 230 °C, (b) 設定温度 320 °C

## 6. 両面アノードックボンディングの方法

これまで、シリコンとガラスの2層のABは十分に研究されてきた。しかし、ガラス-シリコン-ガラスの3層のABはほとんど報告がない。過去に、アノードをシリコンに、2つのカソードをそれぞれガラスに接続し、両面同時にABを行う方法が研究されていた。しかし、空乏層が不均一となるため限界があった<sup>5)</sup>。そこで我々は、ABを前工程と後工程に分けて行うことで、この問題を解決した。

まず、1枚目のガラス (Glass A) とシリコンの間でABを行う。次に、2枚目のガラス (Glass B) とシリコンの間でABを行う。前工程のABと異なる所は、シリコンがアノードに接続されていないことである。そこで、シリコン側面よりプローブ電極を接続してABができるようにした (Fig 5)。なお、プローブ電極は厚さ 130 μm のリン青銅板を放電加工したものである。

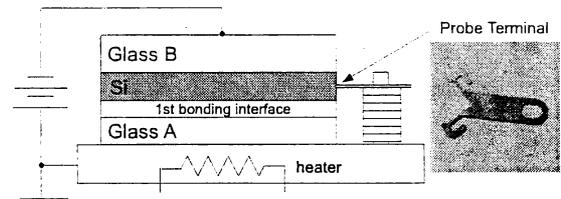


Fig. 5 両面アノードックボンディングの方法

## 7. 装置構成

セルの製作は、カリウムの酸化や大気中の不純物の影響が無いように、真空状態で作業を行う。そのため、AB用の電極針、カリウム蒸着装置、自動ステージを真空チャンバー内に設置する。自動ステージは、水平方向 (Xステージ) と垂直方向 (Zステージ) への移動用に2台設置している。Fig 6に装置の概略図を示す。

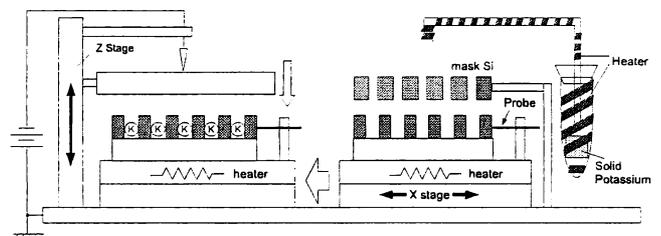


Fig. 6 装置概略図

## 8. セルの製作手順

まず、Xステージ上にシリコン、Glass Aの順に設置する。電極針と基板が接触するように、XステージとZステージをそれぞれ移動させる。Xステージに設置されているヒーターにより、基板を300 °Cに加熱し、電圧1 kVを印加することで前工程のABを行う (Fig 7.a)。

次に、前工程のABを行った基板を反転し、Glass AがXステージ上に接するように設置する。カリウムを蒸着するため、マスク用の加工シリコンの直下まで移動させる。チャンバー内を真空引きし ( $4.6 \times 10^{-5}$  Torr), 蒸着用ヒーターを300 °Cで15分間加熱することで蒸着を行っ

た (Fig 7.b). 蒸着により, 全キャビティに一括してカリウムを導入することができる。

カリウム蒸着後, 基板を Z ステージの電極針直下まで移動させる。Z ステージにはすでに, 後工程の AB で使用する Glass B が設置されている。Z ステージを降下させることで蒸着後の基板上に Glass B を設置できる。カリウムが蒸着されたキャビティを, パイレックスガラスで封をしている状態で, 基板を加熱する。蒸着したカリウムの再蒸発を防ぐためである。基板温度が 300 °C に達したところで, 電圧 1 kV を印加することで後工程の AB を行い, カリウムをキャビティ内に封止する (Fig 7.c)。

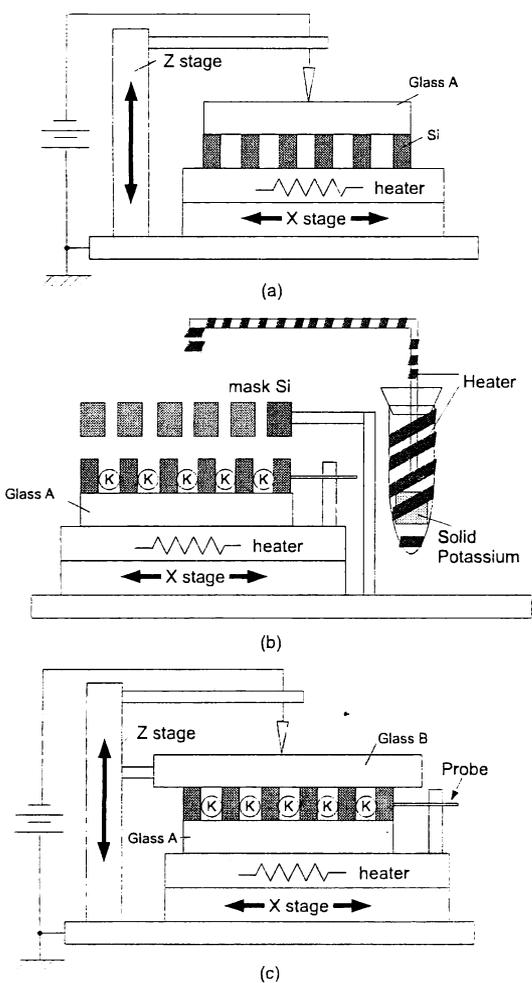


Fig. 7 セルの製作手順 (a) 前工程のアノードティックボンディング, (b) 真空中でのカリウム蒸着, (c) 後工程のアノードティックボンディングによるカリウムの封止

## 9. 吸収スペクトル評価

セルのキャビティ内のカリウムを確認するため, カリウムの D1 吸収線 (770.1 nm) 付近において, 直線偏光による吸収スペクトルの測定を行った。カリウムを蒸気化させるため, セルはベークライトにより作製した断熱容器内部で, 200 °C の熱風により 140 °C 程度に加熱した。レーザー掃引時の透過光強度は, パワーメーターにより計測している。レーザーの径は約 1 mm である。Fig 9 にカリウムセルの吸収スペクトルを示す。

今回, カリウムセルにおいてレーザー波長が 770.099 nm の時, 最大の吸収が得られた。D1 吸収線での吸収スペクトルを計測できたことから, セルのキャビティ内にはカリウムが封入されていることが分かった。

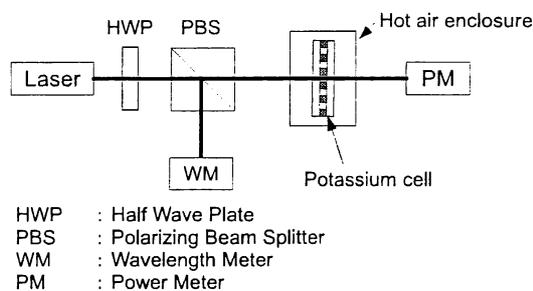


Fig. 8 吸収スペクトル測定装置図

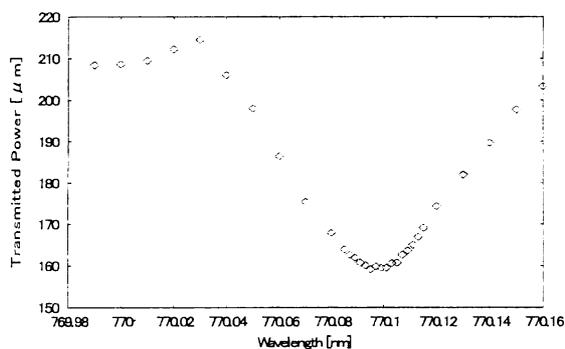


Fig. 9 カリウムセルの吸収スペクトル

## 10. 結論

真空チャンバー内で, 両面アノーディックボンディングとカリウムの蒸着により, セルを製作するシステムを構築した. RIEによる微細加工シリコンを作製したことで, 内積  $0.6 \text{ mm}^3$  以下のマイクロセルを製作することができた. また, カリウムの吸収スペクトルを測定した結果, 封止したキャビティ内に金属原子状のカリウムを確認することができた.

## 参考文献

- 1) Li-Anne Liew, Svenja Knappe, John Kitching : Microfabricated alkali atom vapor cells : Applied physics letters Vol.84, Num.14(2004)
- 2) S.Knappe, V.Gerginov, P.D.D.Schwindt, V.Shah, L.Liew, H.G.Robinson, L.Hollberg and J.Kitching : Atomic vapor cells for chip-scale atomic clocks with improved long-term frequency stability : Optics Letters Vol.30, No.18, Sep.15(2005)
- 3) S.Knappe, P.D.D.Schwindt, V.Gerginov, V.Shah, L.Liew, J.Moreland, H.G.Robinson, L.Hollberg and J.Kitching : J. Opt. A Pure Appl. Opt. 8, S218-S322(2006)
- 4) J.A.Dziuban : Bonding In Microsystem Technology, Springer Series in Advanced Microelectronics, Vol.24 (2006)
- 5) Zhang Tingkai, Zhang Honghai, Xu Jian, Liu Sheng, Gan Zhiyin : Study on triple-stack anodic bonding using two electrodes : Sensors and Actuators A 168-172(2010)