

## パルス磁場を用いた単結晶シリコンの新規切断方法 New Cutting Method of Single Crystal Silicon Using a Pulsed Magnetic Field

金子英雄・大橋健・俵好夫・晴山武\*・三浦登\*

信越化学工業(株) 磁性材料研究所、☎ 915-8515 福井県武生市北府 2-1-5

\*東京大学 物性研究所、☎ 106-8666 東京都港区 7-22-1

H. Kaneko, K. Ohashi, Y. Tawara, T. Haruyama\*, and N. Miura\*

Magnetic Materials R&amp;D Center, Shin-Etsu Chemical Co., 2-1-5 Kitago, Takefu-shi, Fukui 915-8515

\*Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, 7-22-1 Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106-8666

(1998年10月14日受理、1999年1月21日採録)

A new cutting method using a pulsed magnetic field has been studied. A piece of single-crystal silicon is wound with a secondary coil, and is placed in a primary coil. When a current flows in the primary coil, the secondary coil shrinks in the radial direction. We succeeded in cutting the piece of single-crystal silicon using that stress. The smaller the electric resistance of the coil, the larger the stress. The cross-section of a silicon crystal cut by thus method has small radiant steps.

**Key words:** cutting method, pulsed magnetic field, coil, single-crystal silicon

### 1. はじめに

単結晶シリコンや石英ガラスのような脆性材料の切断方法には内周刃切断、外周刃切断、ワイヤーソー切断等のように切断面にそって被切断物を削り取ることによって切断するという除去加工が一般的である。しかし、除去加工には大きな欠点がある。それは加工に時間がかかるということと、切断ロスが大きく、最低でも切断に用いる刃やワイヤーの厚み分を屑にしてしまうことである。大きな切断ロスは特に高価な材料の切断ではコスト高になる原因となっている。そこで、摩擦による切断法、側圧による切断法等各種割り加工がこれまでに考案されてきた<sup>1,2)</sup>。ここではパルス磁場を用いた割り加工による切断方法(パルス磁場切断法)を検討する。パルス磁場切断法とは除去加工の切断刃の代わりに、導線(二次コイル)を被切断物の切断したい面にそってまき、これに磁場を印加することによって切断しようとするものである。一次コイルの中に二次コイルのみをおき、一次コイルに電流を流して磁場を生じさせると、ファラデー電磁誘導の法則にしたがって起電力が生じる。すると二次コイルに電流が流れ、二次コイルはその径を小さくする方向に力を受け、収縮する<sup>3)</sup>。パルス磁場切断法はこの収縮力を利用するものである。一次コイル内に二次コイルをまいた被切断物をいれ、一次コイルに電流を流すと二次コイルは収縮し、被切断物に応力を及ぼす。原理的には応力が十分大きければ、被切断物の大きさにかかわらず切断することができる。単結晶シリコンの場合、まげ強度試験を行ったところ、曲げ強度は $0.4\text{kN/mm}^2$ 以下

であった。また、パルス磁場切断法と同じように被切断物に応力を印加することによって試料を切断する側圧切断法では $80\text{N/mm}^2$ でシリコンを切断することができることが報告されている<sup>2)</sup>。パルス磁場切断法においては $1\text{kN/mm}^2$ 以上の応力を発生することができる。そこで、このパルス磁場切断法で単結晶シリコンの切断を試みたので報告する。

### 2. 実験方法

Fig.1に実験装置の模式図を示す。パルス磁場発生装置はコンデンサーバンク、スイッチ、一次コイルからなる。コンデンサーバンクを所定電圧まで充電したのちにスイッチを閉じ、パルス電流を一次コイルに流すことによって、一次コイル内にパルス磁場を発生させた。スイッチにはイグナイトロンを用いた。用いたコンデンサーバンクの容量は $642\ \mu\text{F}$ 、最大充電電圧は $30\text{kV}$ 、全充電エネルギーは $285\text{kJ}$ であった。一次コイルは鉄製で内径 $86\text{mm}$ 、自己インダクタンスは三浦らが用いた仮定<sup>4)</sup>のもとで計算したところ $118\text{nH}$ だった。パルス幅は数十 $\mu$ 秒程度である。被切断物には直径 $58\text{mm}$ 、長さ $20\text{mm}$ の円柱状の単結晶シリコンを用い、端から $10\text{mm}$ の位置で側面に全周にわたり幅 $1\text{mm}$ 、先端角 $90$ 度の溝を深さ $1\text{mm}$ 入れた。この溝にそって導線を巻き二次コイルとした。二次コイルを巻いた試料を一次コイルの中心と試料の中心が概ね一致するように配置し、パルス磁場を印加した。

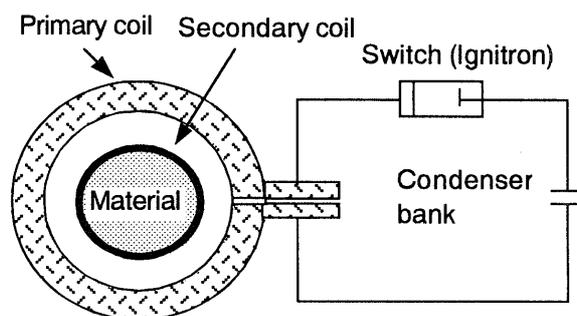


Fig. 1 Schematic of the equipment.

## 3. 実験結果及び考察

## 3.1 二次コイルの材質と線形

融点の低いハンダ(融点 $\sim 200^{\circ}\text{C}$ )を二次コイルに選んだ時には誘導電流によるジュール熱でハンダが融け、切断に必要な応力が発生しなかった。融点の高いニクロム線(融点 $\sim 1400^{\circ}\text{C}$ )を用いた時には印加電圧を20kVまで大きくしてもニクロム線には溶けた様子はなく、ニクロム線が切れただけで被切断物を切断することができなかった。そこで電気抵抗率の低い銅線(電気抵抗率 $1.67\ \mu\Omega\text{cm}$ )を用いたところ被切断物であるシリコンを瞬時に切断することができた。二次コイルである銅線はパルス磁界を印加することによって飛散し、被切断面の側面などに付着していた。

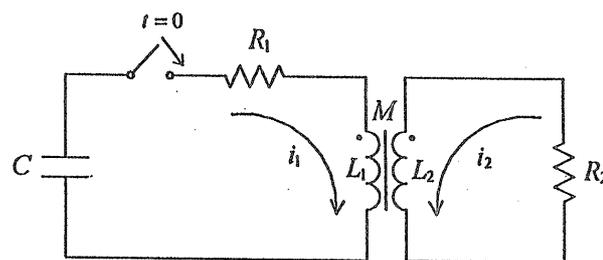
発生する応力の時間変化を計算した。Fig.2に示す等価回路を考え、一次コイルを流れる電流はコイルの内径の面および、側面を流れると仮定<sup>4)</sup>した。結果をFig.3に示すが、二次コイルの温度等を合わせて示した。ここでは、二次コイルで発生したジュール熱は放散せずに蓄積するものとした。スイッチを閉じた(時刻 $t=0$ )後、一次コイル、二次コイルに流れる電流が増大するに伴って発生する応力は増大する。印加電圧20kV、二次コイルが0.5mm $\phi$ の銅線(電気抵抗率 $1.67\ \mu\Omega\text{cm}$ )の時に発生する最大応力は $2\text{kN/mm}^2$ 以上にもなることがわかる。現実には最大応力に達する前の6 $\mu$ 秒で二次コイルである銅はその融点 $1084^{\circ}\text{C}$ を超えるため、二次コイルは溶断し、その時に生ずる応力が最大発生応力になる。この場合は最大発生応力は $1\text{kN/mm}^2$ 程度と考えられる。二次コイルには融点が高い方がより大きな応力を得ることがこの図からわかる。また、二次コイルの熱容量を大きくすると温度上昇がおさえられるので同様の効果が得られる。

二次コイルの電気抵抗率をニクロム線程度( $\sim 100\ \mu\Omega\text{cm}$ )まで大きくした時、二次コイルに誘導される電流が小さくなってFig.4に示すように温度上昇も小さくなる。従って二次コイルがニクロム線では温度上昇は融点以下になるが、発生する応力も $0.04\text{kN/mm}^2$ と小さく切断できなくなる。ハンダでは融点が低すぎ、シリコンを切断するほどの応力を発生する前に溶断する。

また、二次コイルが銅線で線径が0.5mmの時は10kVでシリコンを割ることができたが、線径を0.3mmと細くすると10kVの印加電圧では切断することができなかった。二次コイルである銅線が融点で溶断する時点での発生応力の線径依存性を計算した結果Fig.5に示すようになった。この図より線径を大きくするほど大きな応力が発生することがわかる。二次コイルの線径を太くすることは電気抵抗率を下げるのと同じ効果があり二次コイルを流れる誘導電流が大きくなるだけでなく、熱容量も大きくなるためである。

## 3.2 切断面の観察

二次コイルに直径0.5mmの銅線を用い、充電電圧20kV



C : Capacitance of the condenser bank  
 $R_1$  : Resistance of the condenser bank  
 $L_1$  : Self-inductance of the primary coil  
 $R_2$  : Resistance of the secondary coil  
 $L_2$  : Self-inductance of the secondary coil  
M : Mutual inductance

Fig. 2 Equivalent circuit.

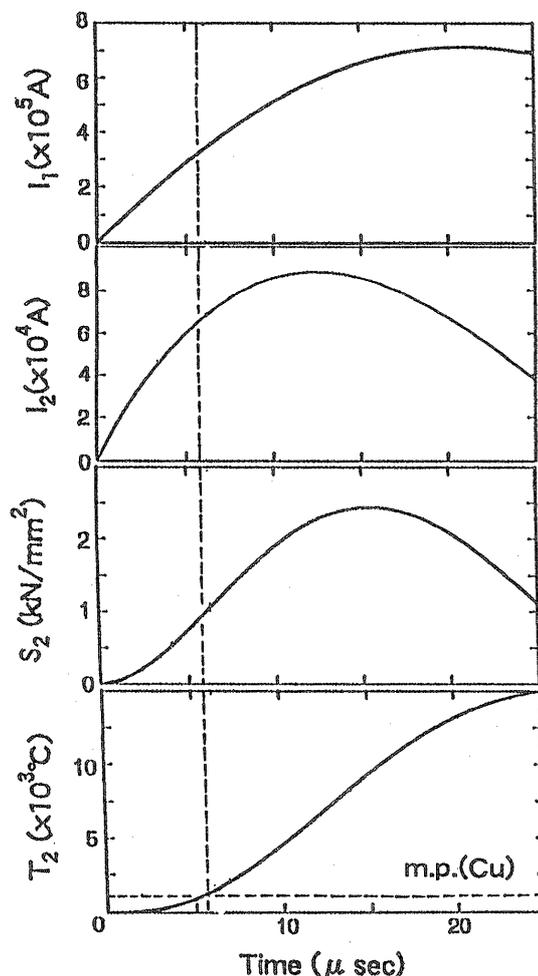


Fig. 3 Time dependence of the current ( $I_2$ ), stress ( $S_2$ ), and temperature ( $T_2$ ) of the secondary coil, and time dependence of the current ( $I_1$ ) of the primary coil, when the charge voltage is 20 kV and the secondary coil is a copper wire with a diameter of 0.5 mm (calculation).

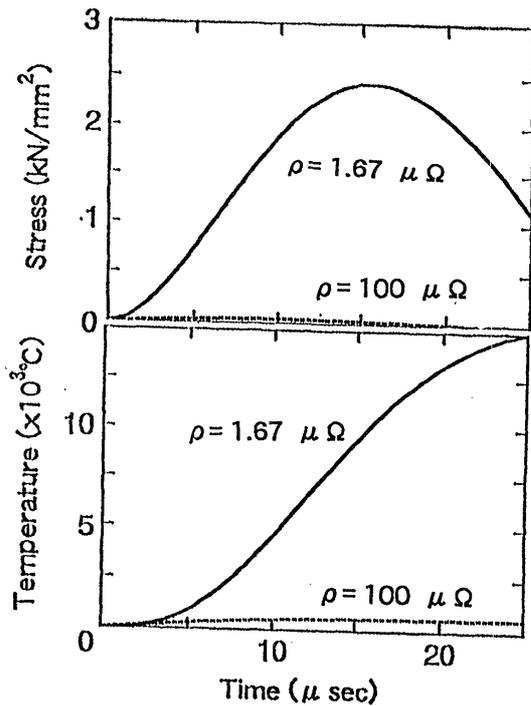


Fig. 4 Time dependence of the stress and temperature of the secondary coil when the charge voltage is 20 kV and the wire diameter of the secondary coil is 0.5 mm (calculation). 'ρ' is the resistivity of the secondary coil.

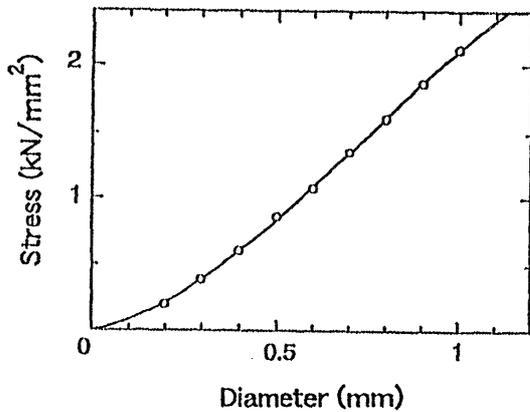


Fig. 5 Relation between the maximum stress and diameter of the secondary coil when the charge voltage is 20 kV and the secondary coil is a copper wire (calculation).

でパルス磁場切断法で切断したシリコンの切断面を Fig.6 に示す。切断面は放射状の段差がついている。触針式表面粗さ計(ミットヨ製)で表面形状を測定したところ 1 つのステップ内の凹凸は $<10 \mu\text{m}$  と平滑だが、ステップ間の段差は数十~百  $\mu\text{m}$  程度であった。

二次コイルの線径を 0.3mm としたところシリコンは切断されなかったが、全周にわたって V 溝内の頂点で多数クラックが生じた。各々のクラックは隣接するクラックと厚

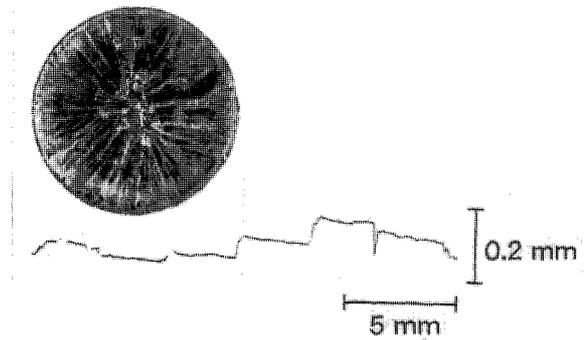


Fig. 6 Photograph and surface profile of a section cut by using a pulse magnetic field.

み方向で数十~百  $\mu\text{m}$  程度のずれが生じていた。観察結果より切断は次のような順序で進行すると考えられる。磁場を印加するとまず被切断物の V 溝の頂点にそって周全体に同時多発的に亀裂がはいる。これを起点に被切断物の周方向中心方向に亀裂が広がって各々の亀裂につながり被切断物が切断すると考えられる。

切断面の一部を #1000 の紙ヤスリで切断で生じた段差がなくなる程度に削り、削った面を目視観察したが、クラックは観察されなかった。

Charge voltage (kV)	Cut face	
10		
15		
20		

Fig. 7 Photograph of a section cut by using a pulse magnetic field. The secondary coil is a copper wire with a diameter of 0.5 mm.

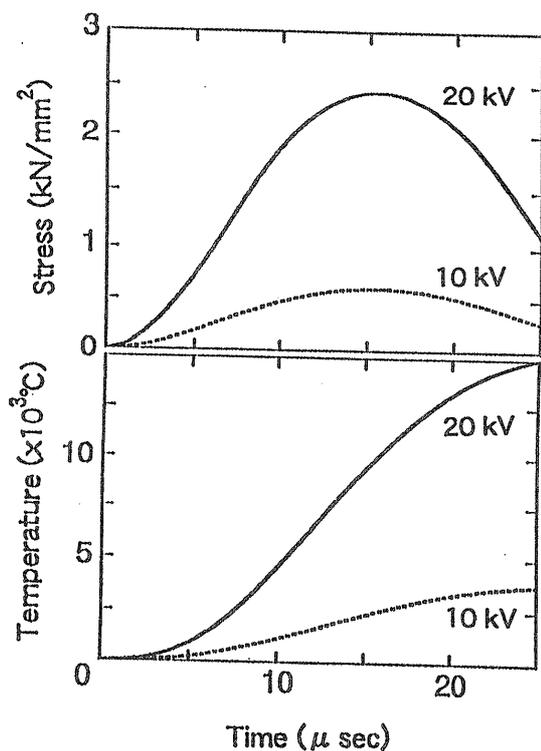


Fig. 8 Time dependence of stress and temperature of the secondary coil when the secondary coil is a copper wire with a diameter of 0.5 mm (calculation). The charge voltages are 10 kV and 20 kV.

### 3.3 印加電圧

コンデンサーの充電電圧を変えたところ、二次コイルの線径が0.5mmの銅線の時、5kVではシリコンは切断され

ず、10kV以上で切断することができた。切断面はFig.7に示すようにどれも放射状の段差が形成されているが、電圧を大きくするほど、段差の中心が被切断物の中心に近づいている。

応力の計算を行い Fig.8 の結果を得た。電圧を大きくするほど発生する応力は大きくなり、かつ短時間で所定の応力が発生する。この結果、電圧を大きくすると被切断物のV溝内に切断初期に多数生じる個々のクラックの発生に時間差がなくなり、放射状段差の中心が被切断物の中心に近づくものと考えられる。

### 4. まとめ

パルス磁場を印加することで試料を切断する新規切断方法を検討した結果、被切断物として用いた単結晶シリコンを瞬時に切断することが可能であることが確認された。パルス磁場によって生じる応力は二次コイルの電気抵抗が小さい方が大きくなり、印加電圧が大きいほど短時間で大きな力を発生することがわかった。その切断面は放射状の段が形成され、形成される段の高さ分だけが加工ロスとなるため、今後より平滑な面で切断することが必要である。

### 文献

- 1)佐藤和朗:切断の魔術(裳華房,東京1993).
- 2)小松辰夫:パワーデザイン,25,88,(1987).
- 3)三浦登、木戸義勇、河内一芳、小黒勇、近角聡信:固体物理,9,659(1974).
- 4)N. Miura, and S. Chikazumi: Jpn. J. Appl. Phys., 18,553,(1979).