

第2章 沸騰限界熱流束近傍の気泡下部液膜内圧力変動の測定

第1節 緒論

2-1-1 まえがき

本研究では、沸騰限界熱流束発生メカニズム解明の重要なステップとして、沸騰限界熱流束時の蒸気柱下部液膜圧力変化の測定を、新しく作成した微小高速応答圧力センサーで行った。気泡下部液膜内圧力変動が明らかになれば、気泡下部液膜への液体供給のメカニズムを解明するカギとなり、従来の沸騰メカニズムでは解明のできなかった複雑な沸騰現象の時間的変化の説明を目指す。また気泡下部への液体供給を生み出す気泡下部液膜内圧力の時間的変化の測定を行い、限界熱流束発生に関係する気泡下部への液膜供給のメカニズムを解明することを目的としている。

2-1-2 従来の研究

現在、限界熱流束近傍の沸騰メカニズムについては、Zuber モデル⁽⁵⁾、原村・甲藤モデル⁽⁶⁾などの代表的モデルが提案されている。

Zuber モデルは、Taylor 不安定と Helmholtz 不安定による蒸気柱の蒸気の種類が限界に達し、限界熱流束が発生するというモデルであり、原村・甲藤モデルは気泡下部の液膜に微少な蒸気茎を仮定し、蒸気茎の蒸気と液膜との Helmholtz 不安定により液膜厚さを決定し、伝熱面上で気泡離脱までの時間と、その液膜が乾くまでの時間が一致したときに限界熱流束が発生するというモデルである。

また、近年 Dhir らは、これら二つのモデルをもとに気泡下部液膜厚さを考慮した沸騰熱伝達モデル⁽⁸⁾を提案している。このモデルは、「気泡はキャビティから成長し、限界熱流束近傍において気泡の直径が最大値になった時に安定形態をとる。気泡下部液膜の蒸発が茸状気泡を支えていて、気泡は制止しており、気泡柱周辺の流れや熱過程は定常状態で起こる。気泡が安定状態にあるとき、茸状気泡の気液界面の側壁が伝熱面と直角を成しているとして、液膜への液体供給を作る出す圧力勾配は、気泡柱周方向半径が変わることによって生じる。壁面過熱度があがると蒸発速度が増し、毛細管力は短い濡れ面長さに必要な分の流入量を維持することしかできない。このことにより、限界熱流束に達する」というものである。

Zuber モデルは、静的なモデルで複雑な沸騰現象の時間的変化の挙動を説明できない。また原村・甲藤モデル及び Dhir モデルは、上向き面、下向き面など多

様な伝熱面における沸騰現象を統一的に説明することのできるモデルであるが、これまでの我々の実験では、気泡下部に微小な蒸気茎の存在を確認することができなかった。

第2節 実験装置及び方法

2-2-1 実験装置の概要および特徴

Fig. 2(a)に実験装置の概略図、Fig. 2(b)に伝熱面付近の詳細図を示す。熱媒体には、代替フロンHCFC123（沸点 27.5℃）を使用した。容器は、厚さ 30mm の透明塩ビ製で、テフロン製の底部には、ヒーターのついた直径 10cm 高さ 24cm の銅ブロックを埋設した。これにより安定した熱供給を行うことができる。銅ブロックの上部には垂直上向きに、直径 5mm 高さ 5cm の銅製棒が取り付けられており、最上部が伝熱面となる。この伝熱面はテフロン製の底部より 1mm 突き出た形をしており、実験を行う際には塩ビの薄板とアラルダイトを用いて平坦にし、沸騰への伝熱面縁による影響が出ない様にした。容器内には縦、横、高さ 23cm の熱媒体を貯め、限界熱流束近傍において伝熱面上に、直径約 5mm の単一気泡を生成する。また、銅ブロックは、オイルの強制対流により冷却される構造で、遷移沸騰領域を安定に実現できる。さらに、熱電対は、直径 0.5mm のシース K 型熱電対が、深さ方向に 5mm 間隔で伝熱面の下部に 5 本埋め込まれ、熱流束および伝熱面温度が測定される。容器内圧力は、大気圧に維持した。

圧力変動測定実験は、核沸騰領域→限界熱流束→比較的高過熱度の遷移沸騰領域へ至る加熱過程、比較的高過熱度の遷移沸騰領域→限界熱流束→核沸騰領域に至る冷却過程の両過程において行った。熱流束および過熱度は、伝熱面下部に埋め込まれた 5 本の熱電対により、データをサンプリングした。このサンプリングと同時に、新たに制作した圧力センサーにより、気泡下部液膜内圧力の時間的変化も測定した。

2-2-2 微小高速応答圧力センサー

本実験の最大の特徴は、気泡下部に形成される薄い液膜の圧力変化の測定を行った点である。Fig. 3 に、従来の小型圧力センサーの代表的なものとしてピエゾ抵抗式、薄膜式、静電容量式などを挙げる。

これらの圧力センサーを伝熱面に取り付けると、伝熱面に凸凹が付くため、熱の伝わり方や流れを乱す事になる。また核沸騰において、伝熱面の凸凹や材質の違いによる熱の伝わり方の微細な変化により、核を生成するため、圧力センサーは伝熱面の内部に組み込まれている事が必要となる。

今回作成した微小高速応答圧力センサーの原理は、「単一気泡を生成する伝熱面上に、微小高速応答圧力センサーを埋設し、伝熱面及び圧力測定プローブ

を覆う銅製の振動板(厚さ $20\mu\text{m}$)を張り付ける。」というものである。これにより圧力センサーが沸騰に及ぼす影響を最小限度とする事ができる。振動板から測定電極までの距離は $0.9\mu\text{m}$ で、最大 100kPa までの使用が可能である。振動板は、気泡下部液膜の圧力変動に応じて上下し、振動板—電極間の距離が変化する。変位計(IWATSU ST-3521)より数ボルトの交流電圧 (20kHz) をプローブに付与する。アースされている振動板との間に生じる静電容量を再び変位計で検出し、入力電圧と出力電圧の差からアースされている振動板との距離に対応した電圧値を得る。気泡下部液膜の圧力変動の時間的变化を表わしている出力電圧は、解析器(YOKOGAWA HOKUSHIN ELECTRIC MODEL-3655)で A-D 変換され、GP-IB を通してコンピューターに送られる。コンピューターに送られた電圧値にキャリブレーションを行い、気泡下部液膜の圧力に変換する。なお振動板を含む伝熱面全体が、アースされているため、振動板以外のものとの間に静電容量を持つ。しかし振動板から測定電極までの距離は $0.9\mu\text{m}$ と、他のアースされた部分から測定電極までの距離と比べ近く、さらに電極は内側に測定電極、外側に測定電極と同電位のガード電極を配した2重輪の形状にする事により、電極の端効果を防ぎ、電気力線がプローブから振動板へ直行する仕組みとなっている。このため振動板と測定電極の直線距離に応じた電圧値が得られる。圧力計内に空気が封入されており、これが振動板の振動にダンパの働きをする可能性がある。振動板の厚みを変えることにより、固有振動数を選択することができるが、圧力変動が振動板の降伏点を越えない必要がある。本実験においては、圧力測定を行う前に第3章でも述べる気泡下部液膜厚さ変動測定を行い、気泡下部液膜内の液体流動速度を導き出している(3-4-4参照)。これにより、気泡下部液膜内圧力変動を予測し、銅薄膜厚さ $20\mu\text{m}$ で耐圧力 100kPa となる様設計した。測定は、測定周波数 $500\text{Hz}\sim 20\text{kHz}$ までの予備実験を行い、最も雑音の少ない波が測定できた測定周波数 2kHz 、測定周期 0.5ms で行った。なお固有振動数は 152kHz と測定周波数に比べ高い。

2-2-3 圧力計製作及び取り付け方法

圧力計の取り付けは、まず振動板の張り付けから行う。振動板の取り付けにはんだ(厚さ約 $10\mu\text{m}$)を用いたため、シリコン基板上に作られた電極が、はんだ取り付け時の熱によって壊れるのを防ぐためである。振動部へのはんだの付着は無い。また、はんだによる熱流束の変化は、はんだの厚みが極めて薄いため無視する事ができる。Fig. 4 に圧力計取り付け方法を示す。

1. 伝熱面上に電極を埋設する溝を掘る。
2. 圧力計の振動板となる銅板を伝熱面にはんだを用いて接着する。なおこの時圧力計の振動板となる部分にはんだが付着しない様にする。

3. 電極から変位計へつなぐ線は、カーボンペーストを用い接着し、アラルダイトで補強する。
4. 電極を溝に差し込み、アラルダイトで固定する。
5. その他の部分もアラルダイトで密封し、圧力計への空気の進入を防ぐ。

電極の製作には、次の様な工程を経た。まず電極を蒸着させる溝をエッチングにより掘る。この溝の深さが振動板の振幅を制限し、測定静電容量を決定付ける。Fig. 5 にエッチング方法を示す。

1. スピンコートを用い、シリコン基板上にフォトレジスト $1\sim 2\mu\text{m}$ の膜を作る。
2. シリコン基盤に溝の形のマスクを被せ、ベーキング器で紫外線露光する。
3. 現像液を用い、エッチングする部分のフォトレジスト膜を落とす。
4. 顕微鏡で確認。
5. ハードベーキング。
6. 酸化膜のエッチング。
7. エッチング液の除去。
8. デックタックを用い、深さ測定。

今回行ったエッチング深さは $0.9\mu\text{m}$ である。

次にこの溝に金の電極を 200nm 程度蒸着させる。蒸着工程については Fig. 6 に示す。

1. スピンコートを用い、先程溝を形成したシリコン基板上に、フォトレジスト $1\sim 2\mu\text{m}$ の膜を作る。
2. シリコン基盤に電極の形のマスクを被せ、ベーキング器で紫外線露光する。
3. 現像液を用い、電極の形の部分に付いたフォトレジスト膜を落とす。
4. シリコン基盤全体に金を蒸着する。
5. エッチングにより金の蒸着したフォトレジスト膜を落とす。
6. 顕微鏡で確認。

次に製作した電極をダイシングにより切り出す。

1. 固形のロウを使用済みマスクに塗り、その上に Si 基盤を乗せる $1\sim 2\mu\text{m}$ の膜を作る。
2. 切削幅 $50\mu\text{m}$ を考慮し、顕微鏡を用いて縦軸補正
3. カット

という手順で行った。

Fig. 7(a) 圧力計を取り付ける前の沸騰曲線、Fig. 7(b) に圧力計取り付け後の沸騰曲線を示す。圧力計をつける事による限界熱流束、及び過熱度の変化はほぼ見られなかった。

第3節 校正方法

2-3-1 圧力測定機器の校正方法

圧力測定のカリブレーションは、実験槽内に熱媒体を入れない状態で加減圧を行い、出力電圧値を計測した。圧力測定には水銀マンノメーターを使用した。Fig. 8(a)に圧力を変化させた時の出力電圧値をしめす。また Fig. 8(b)に今回の使用測定領域+20~-20kPa 内の出力電圧値を示す。実験の際には熱媒体を入れ、飽和蒸気圧温度の未沸騰状態における圧力を測定し、これを 0kPa とする。校正には Fig. 8(b)内の式を用いる。沸騰時には周りの熱媒体の圧力と、気泡下部液膜の圧力差を測定する事になる。

2-3-2 圧力測定機器の測定誤差

圧力測定誤差は伝熱面温度変化による温度ドリフトが考えられるが、圧力計内部の封印空気量は体積にして $7.07 \times 10^{-3} \text{mm}^3$ と微量で、温度ドリフトによる影響はほぼ無い。

気泡下部液膜内圧力測定の増幅機器と測定機器による誤差は、すべての気泡下部液膜内圧力において 0.05 (V) の出力電圧誤差を持つ。電圧値の誤差は、機械的要因によるものである。これは 5kPa 分に相当する。

第4節 沸騰気泡下部液膜内圧力の絶対値とその変動

圧力変化の測定結果を、Fig. 9 及び 10 に示す。測定圧力は気泡下部液膜内の中心付近と気泡下部液膜外の圧力差を示す。このため圧力の値が負の時気泡下部への液体供給が生じると考えられる。Fig. 9 には (a) 核沸騰領域 (b) 限界熱流束 Fig. 10 には (a) 限界熱流束 (b) 遷移沸騰領域の結果を示す。本実験において圧力の値は正負を交互に示した。最大圧力は約 20kPa、最小圧力は約 -20kPa であった。また周波数は約 20Hz であった。また Fig. 11 には圧力計の設置位置を変え、気泡下部液膜内の端付近と気泡下部液膜外の圧力差をの測定結果を示す。この測定においても圧力の値は正負を交互に示した。最大圧力は約 100kPa、最小圧力は約 -80kPa であった。また周波数は約 20Hz であった。これらの測定結果より次の事が言える。

1. 気泡下部液膜への液体供給及び排出が交互に行われ、その時の液体流動の駆動力となる圧力変化は、最大圧力は約 20kPa、最小圧力は約 -20kPa であった。
2. 気泡下部液膜内の圧力は場所によって異なり、特に気泡下部端においては高い圧力変化を持つ。

さらに、気泡下部液膜厚さの時間変化がわかれば、気泡下部液膜への液体供

給及び排出速度が分かる。これらにより液体流動を把握する事ができるはずである。

第5節 本章の結論

マイクロマシン技術を活用した微小高速応答圧力センサーを考案し、沸騰限界熱流束近傍の気泡下部液膜内圧力変動を測定し、以下の結果を得た。

1. 最大圧力は約 20kPa、最小圧力は約-20kPa であった。また周波数は約 20Hz であった。
2. 圧力計の設置位置を変え、気泡下部液膜内の端付近と気泡下部液膜外の圧力差を測定した。この時の最大圧力は約 100kPa、最小圧力は約-80kPa であった。また周波数は約 20Hz であった。
3. 気泡下部液膜への液体供給及び排出が交互に行われ、その時の液体流動の駆動力となる圧力変化は、最大圧力は約 20kPa、最小圧力は約-20kPa であった。
4. 気泡下部液膜内の圧力は場所によって異なり、特に気泡下部端においては高い圧力変化を持つ。

さらに、気泡下部液膜厚さの時間変化がわかれば、気泡下部液膜への液体供給及び排出速度が分かる。これらにより液体流動を把握する事ができるはずである。これに付いては第3章に述べる。

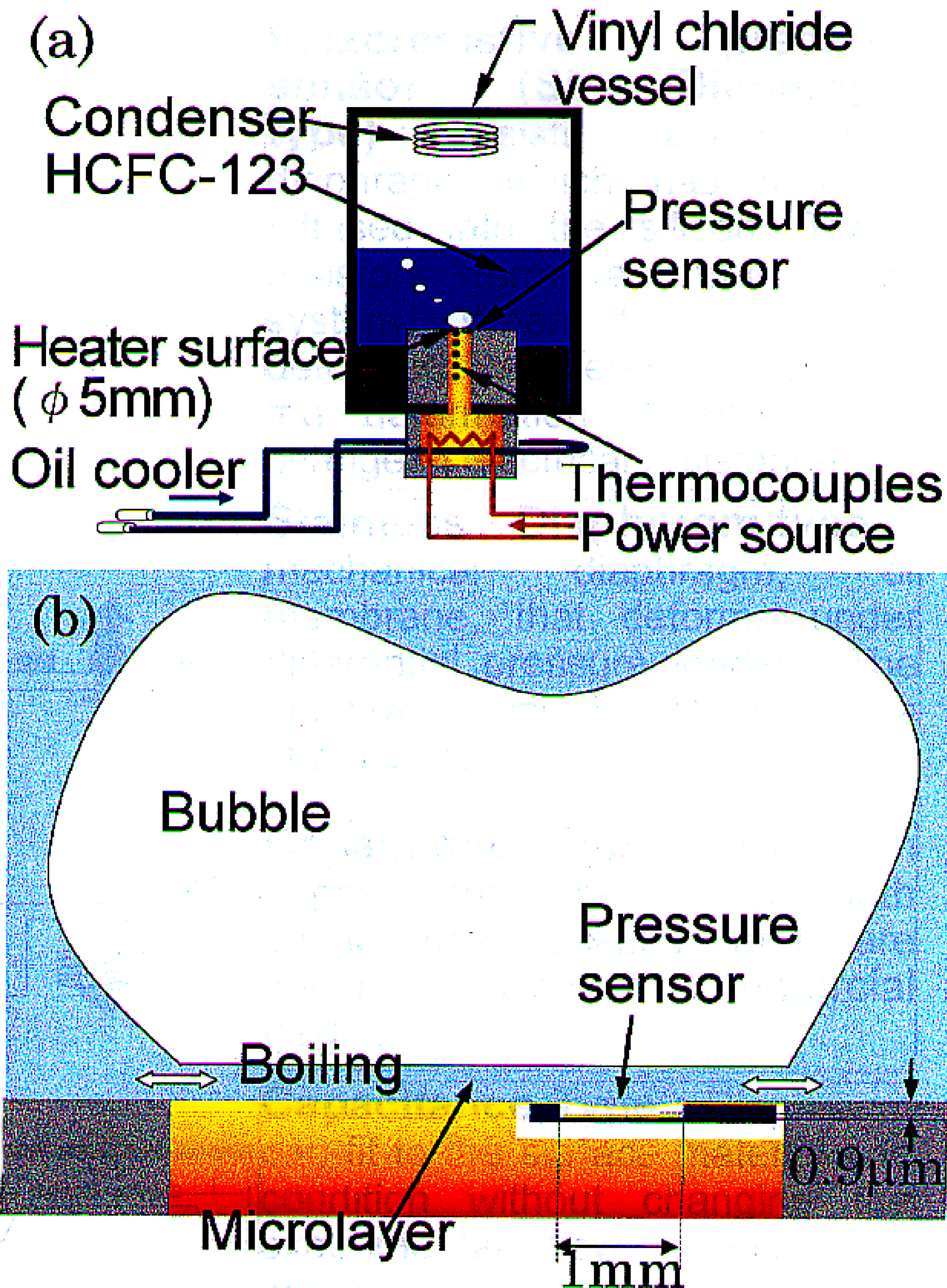
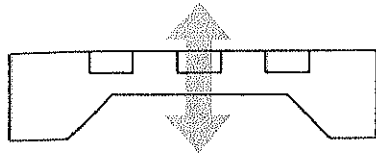
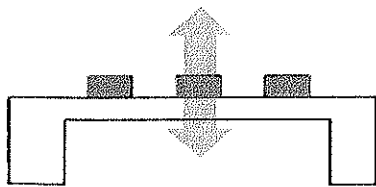


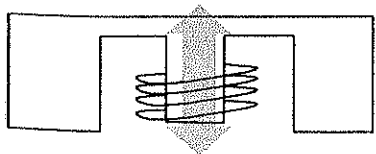
Fig.2 (a) Experimental apparatus
(b) Heater surface magnification



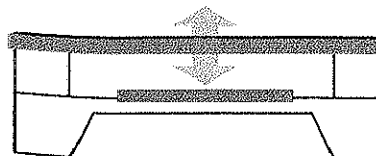
Piezoresistive pressure sensor (Si Diaphragm type) : consists of a thin silicon diaphragm which has resistors diffused into the silicon. These resistors form a strain gage system. When the silicon is deformed by differential pressure, the deformation is sensed by change in electrical resistance.



Stainless Diaphragm type : mechanical diaphragm, or membrane, that deforms under differential pressure loading. The diaphragm can be fitted with a strain gage.



Capacitance Type : Diaphragm gages can be fitted with capacitance pickups and are commonly used in commercial gages



Capacitance Type : Diaphragm can fit to the surface material and condition without changing the experimental flow and heat pattern.

Fig.3 Pressure sensor list

Solder Sealing

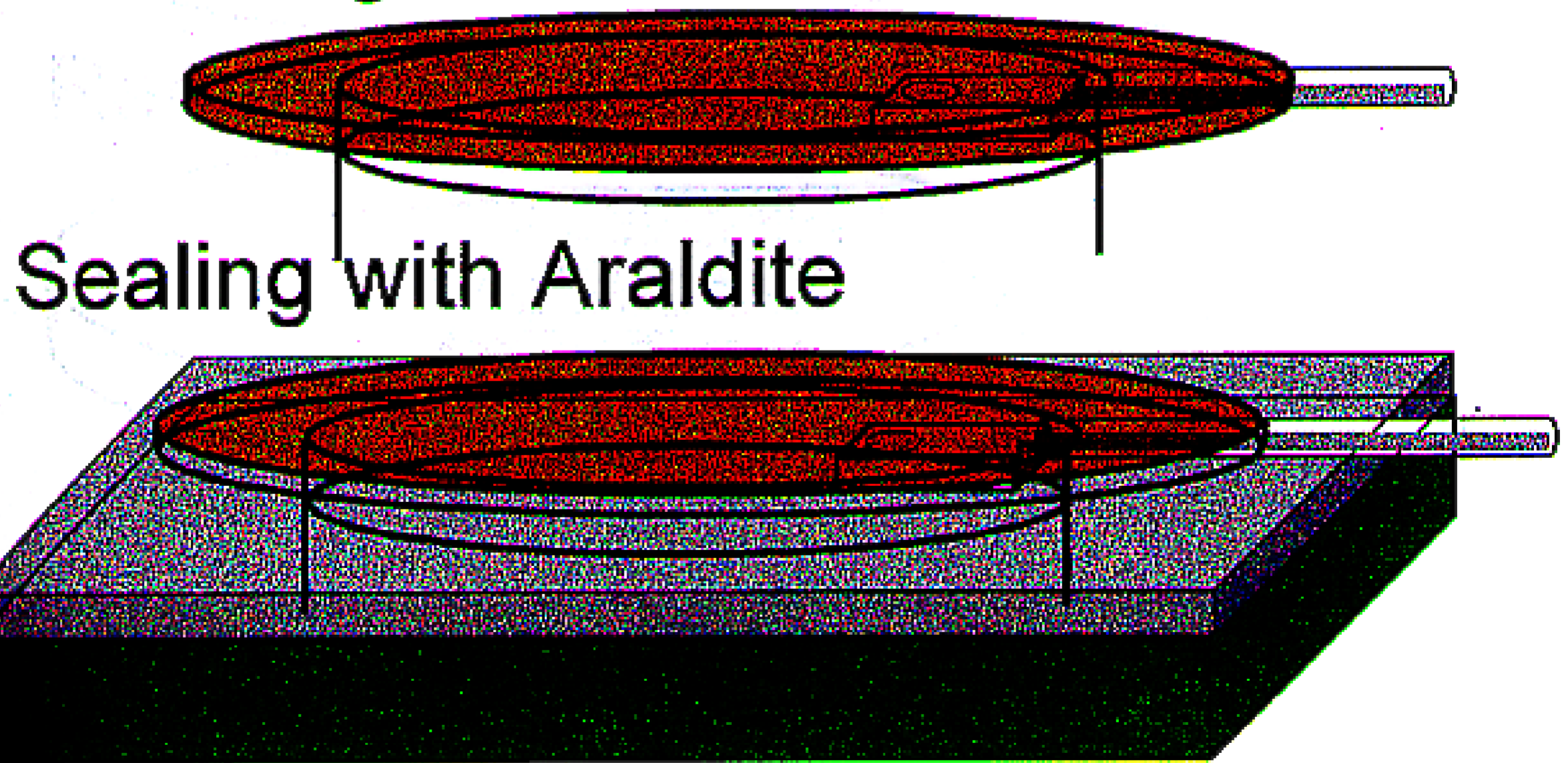
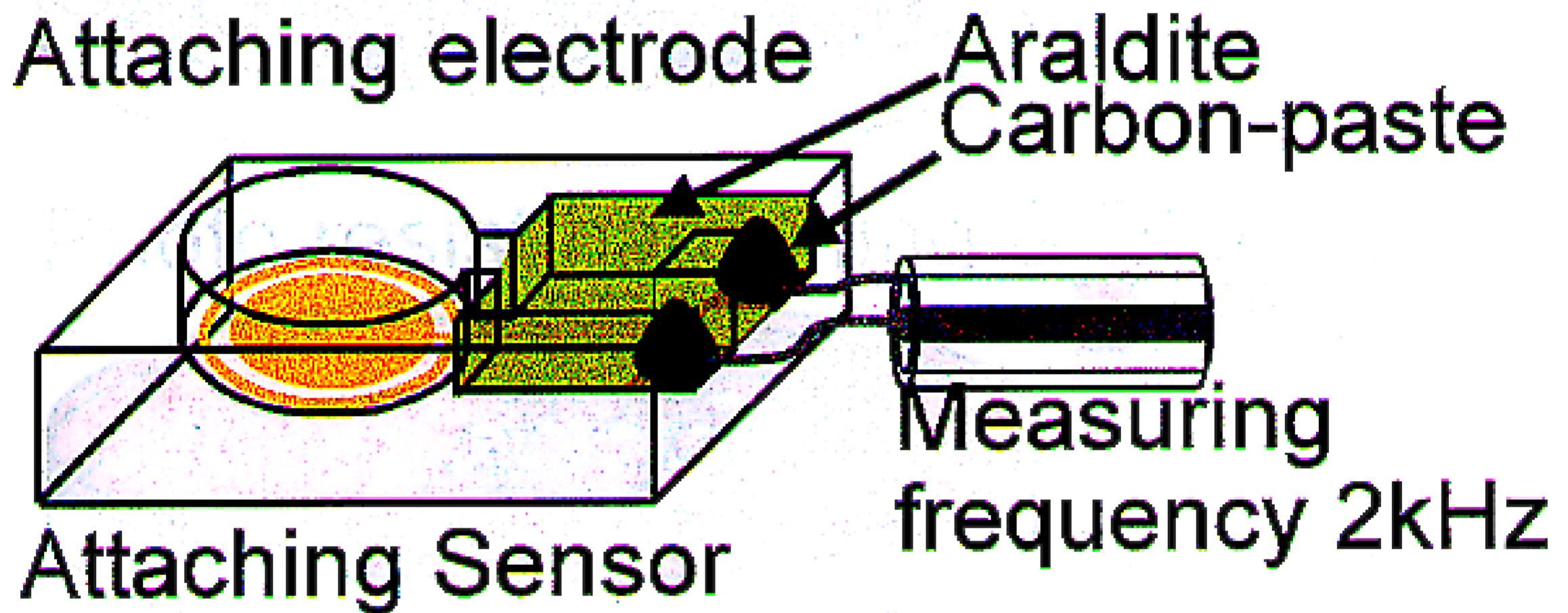
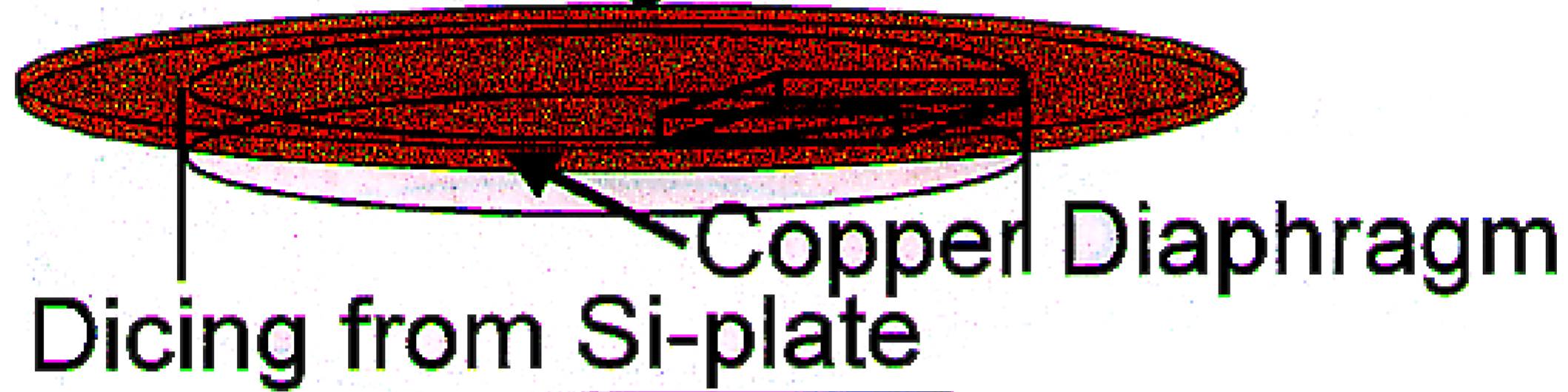


Fig.4 The process of laying pressure sensor under the heat transfer surface

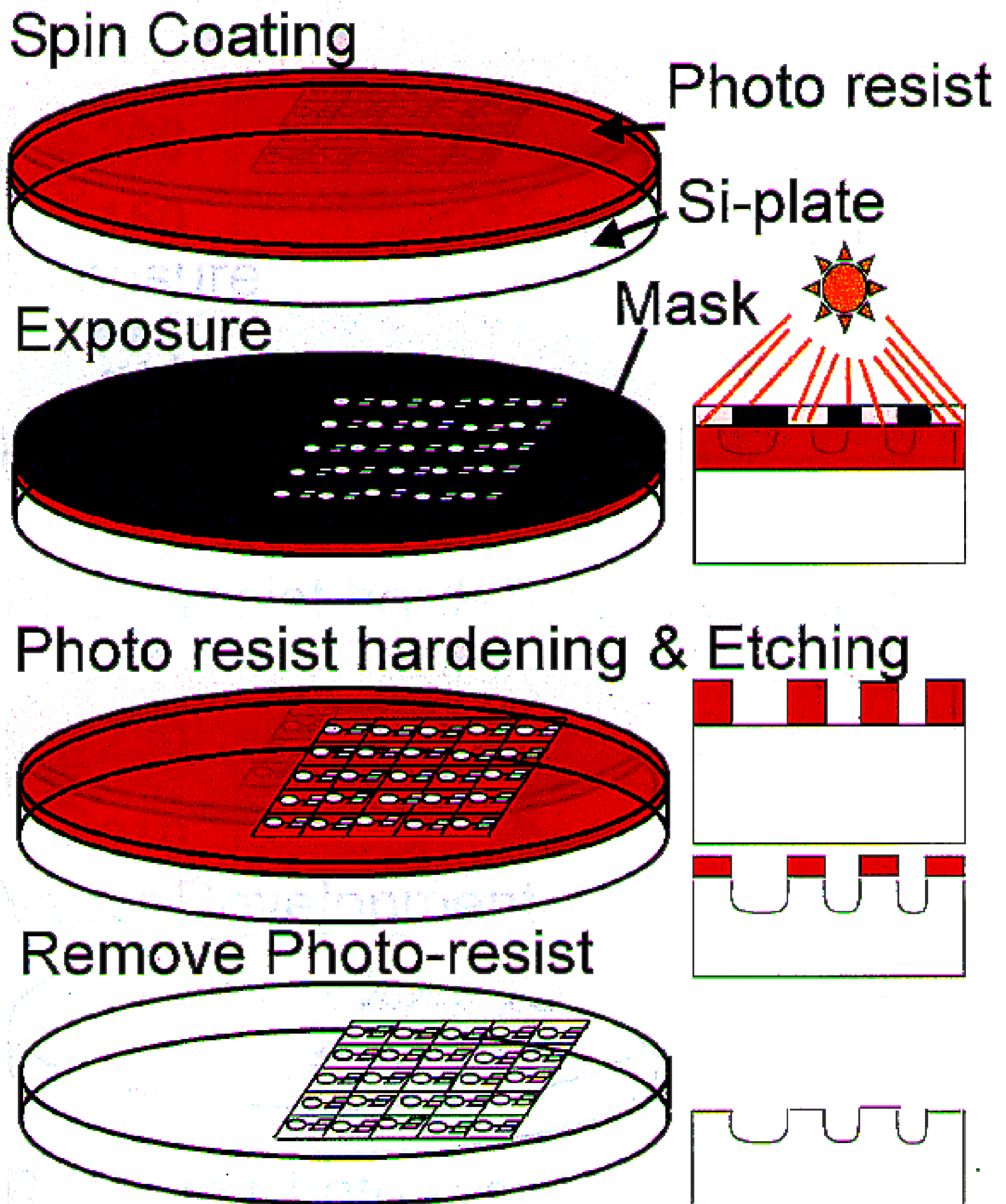
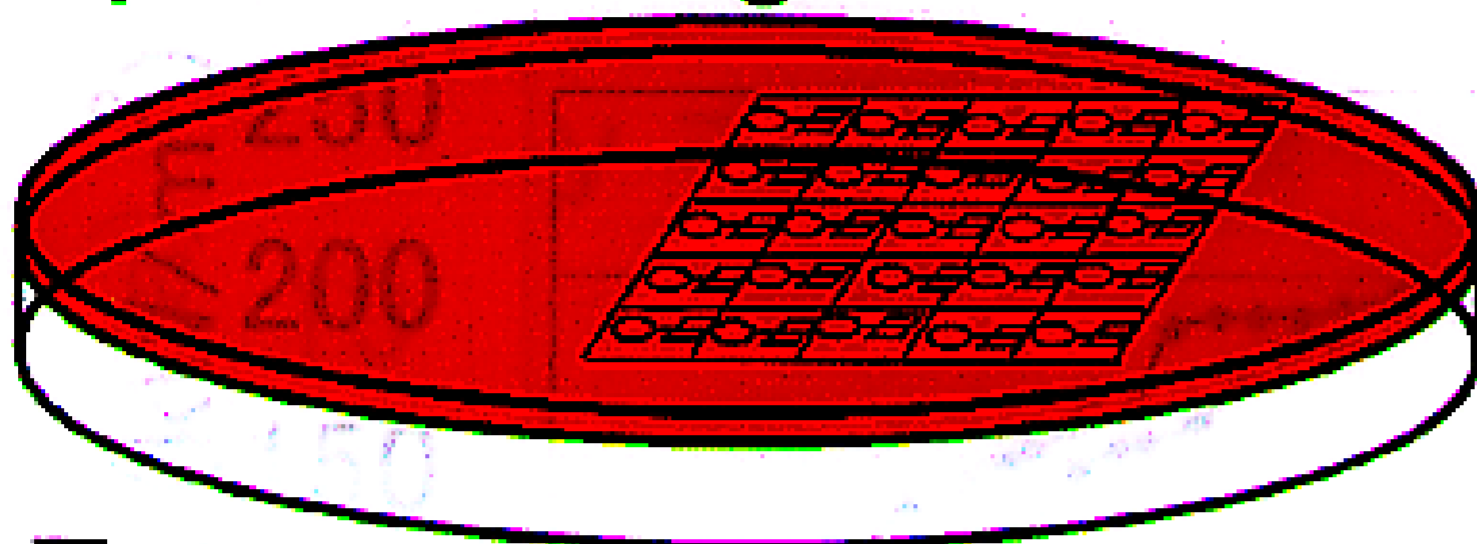


Fig.5 Etching process

Spin Coating



Exposure

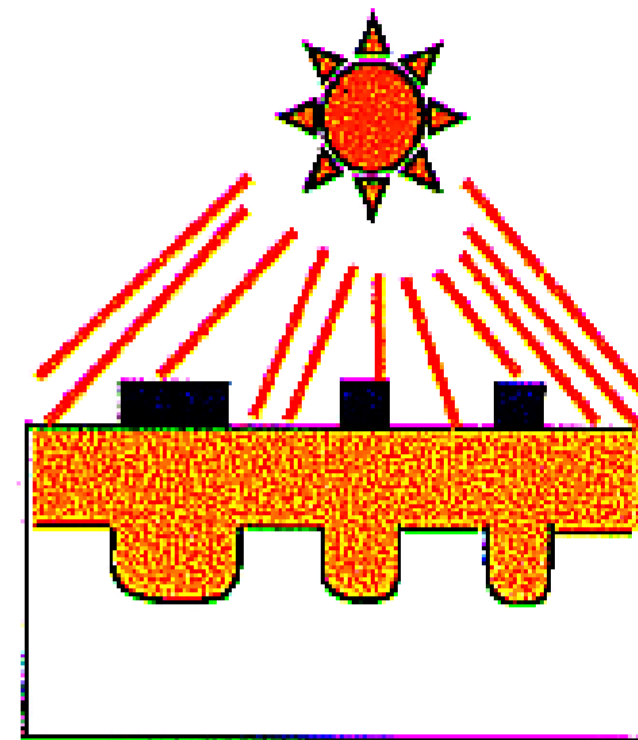
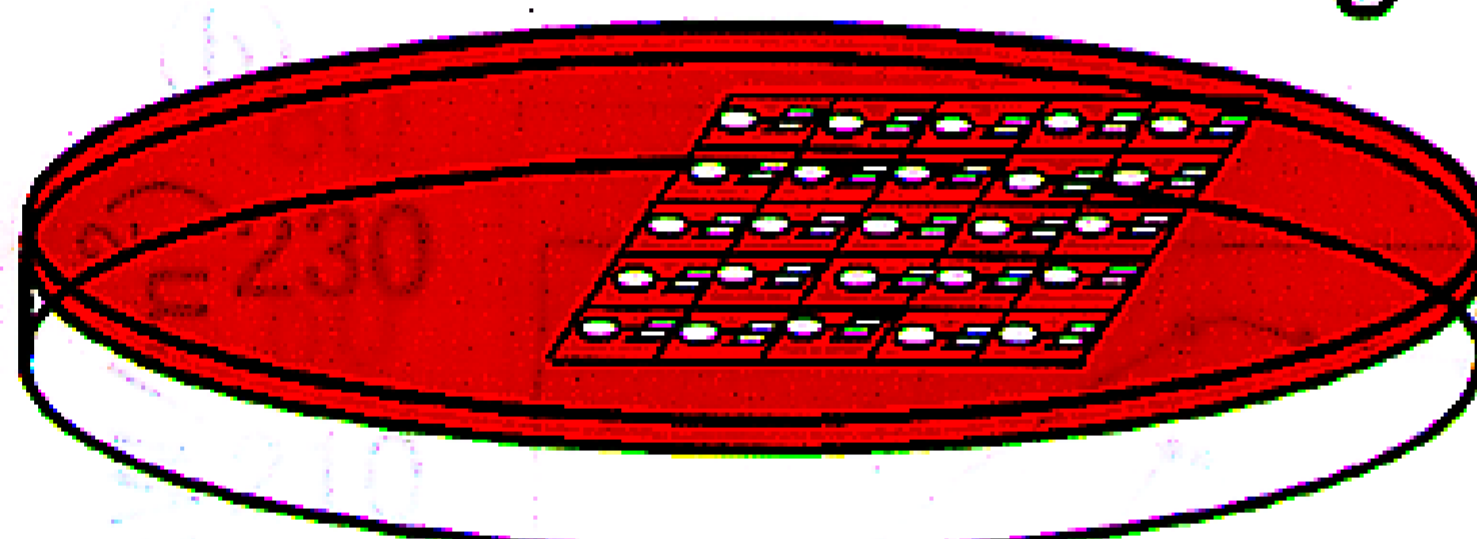
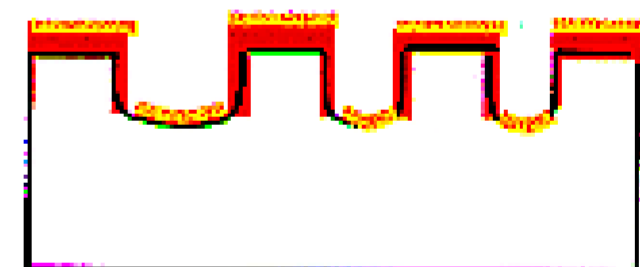
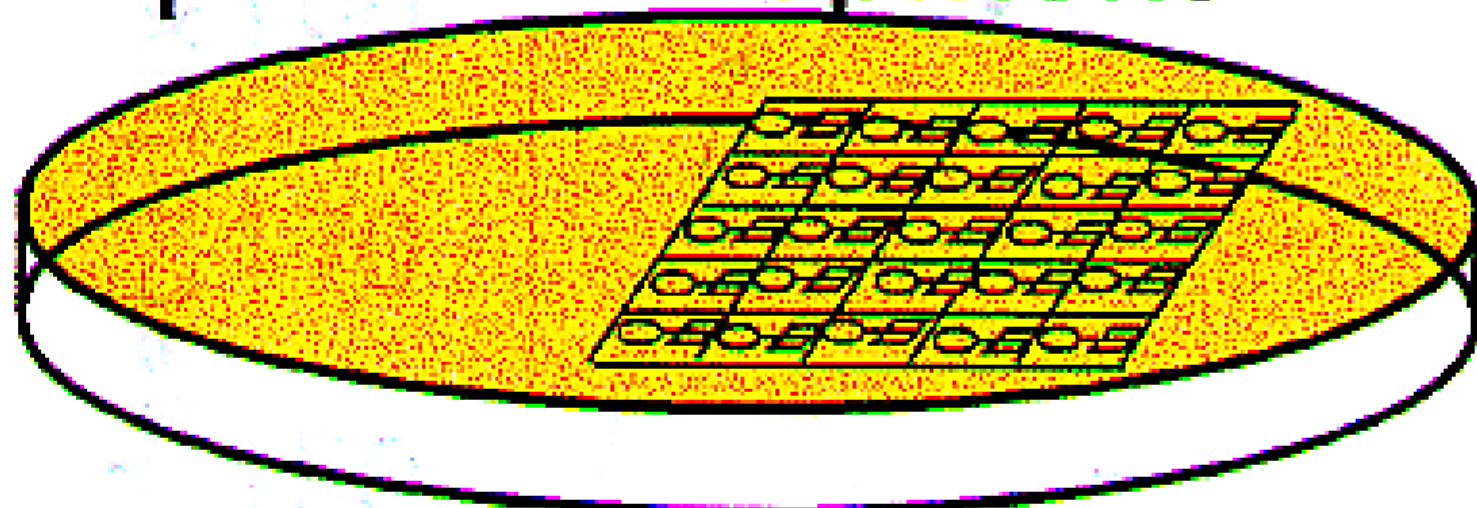


Photo resist hardening & Etching



Vapor Development



Remove Photo-resist

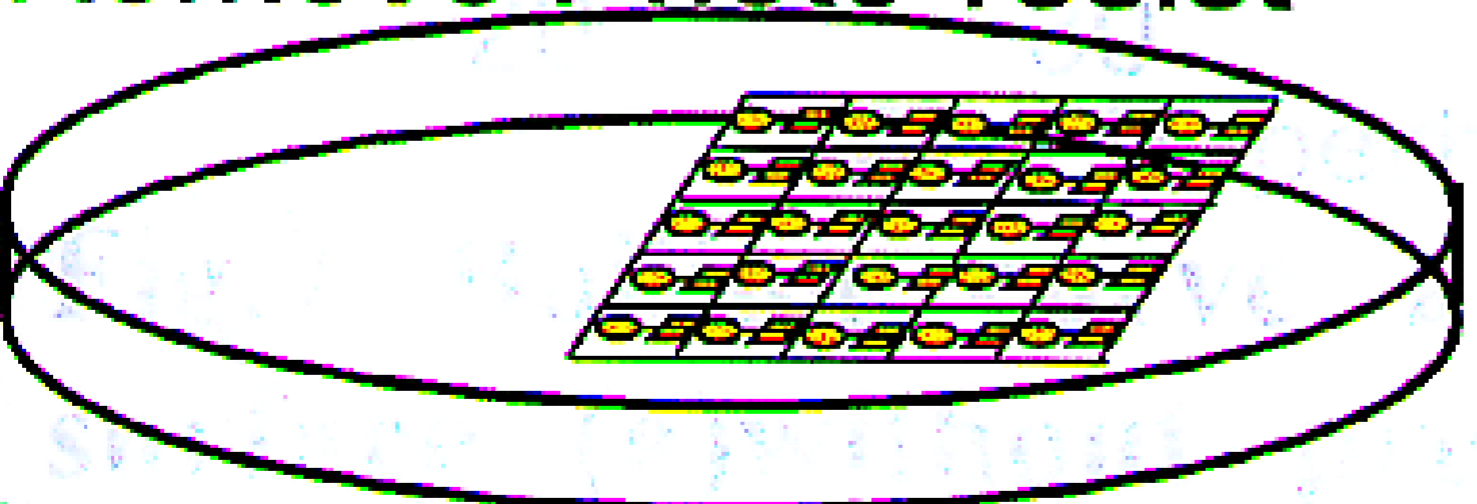


Fig.6 Electrode manufacturing process

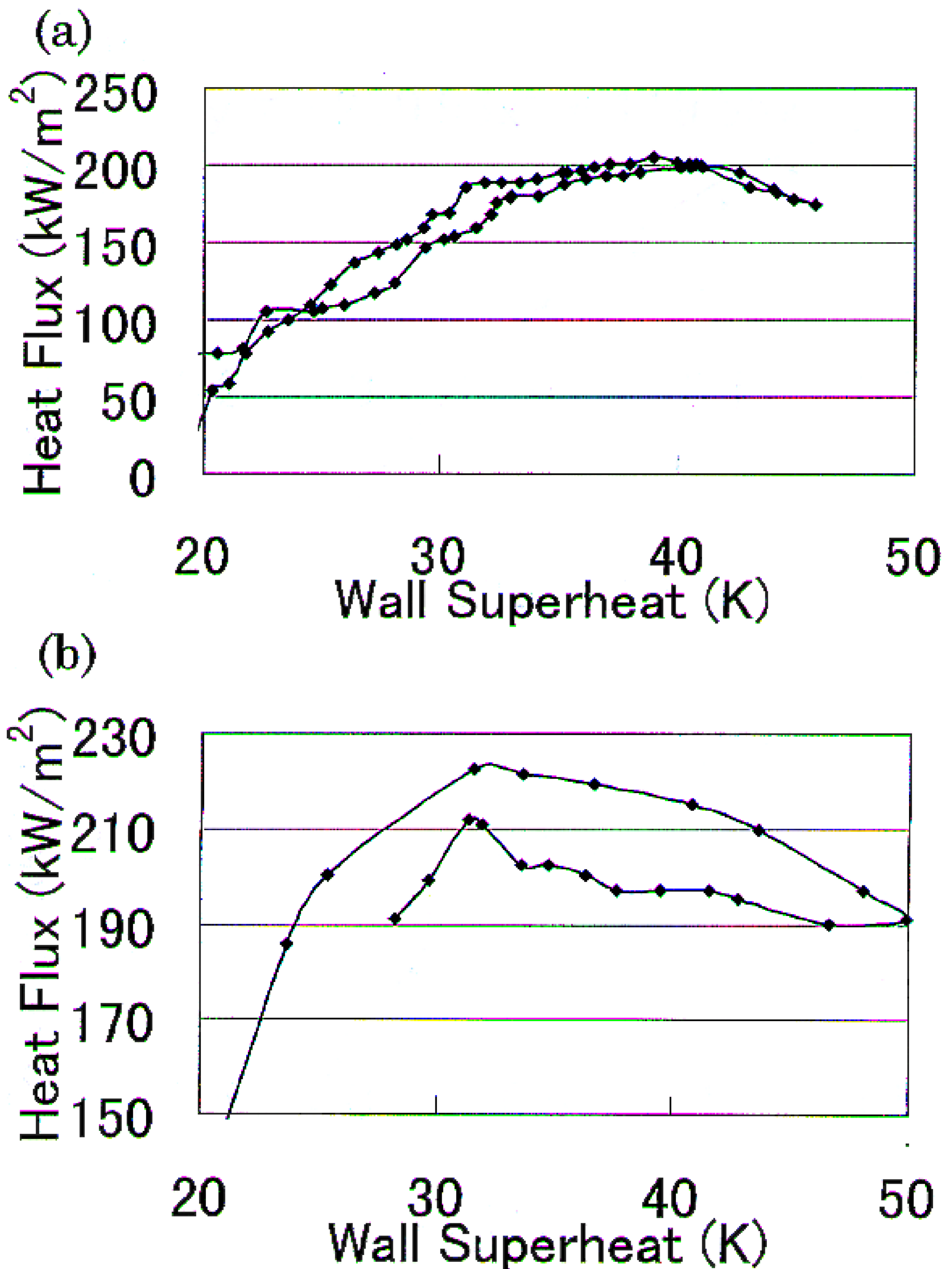


Fig.7 Boiling curve at the heater surface (a)without pressure sensor (b)with pressure sensor

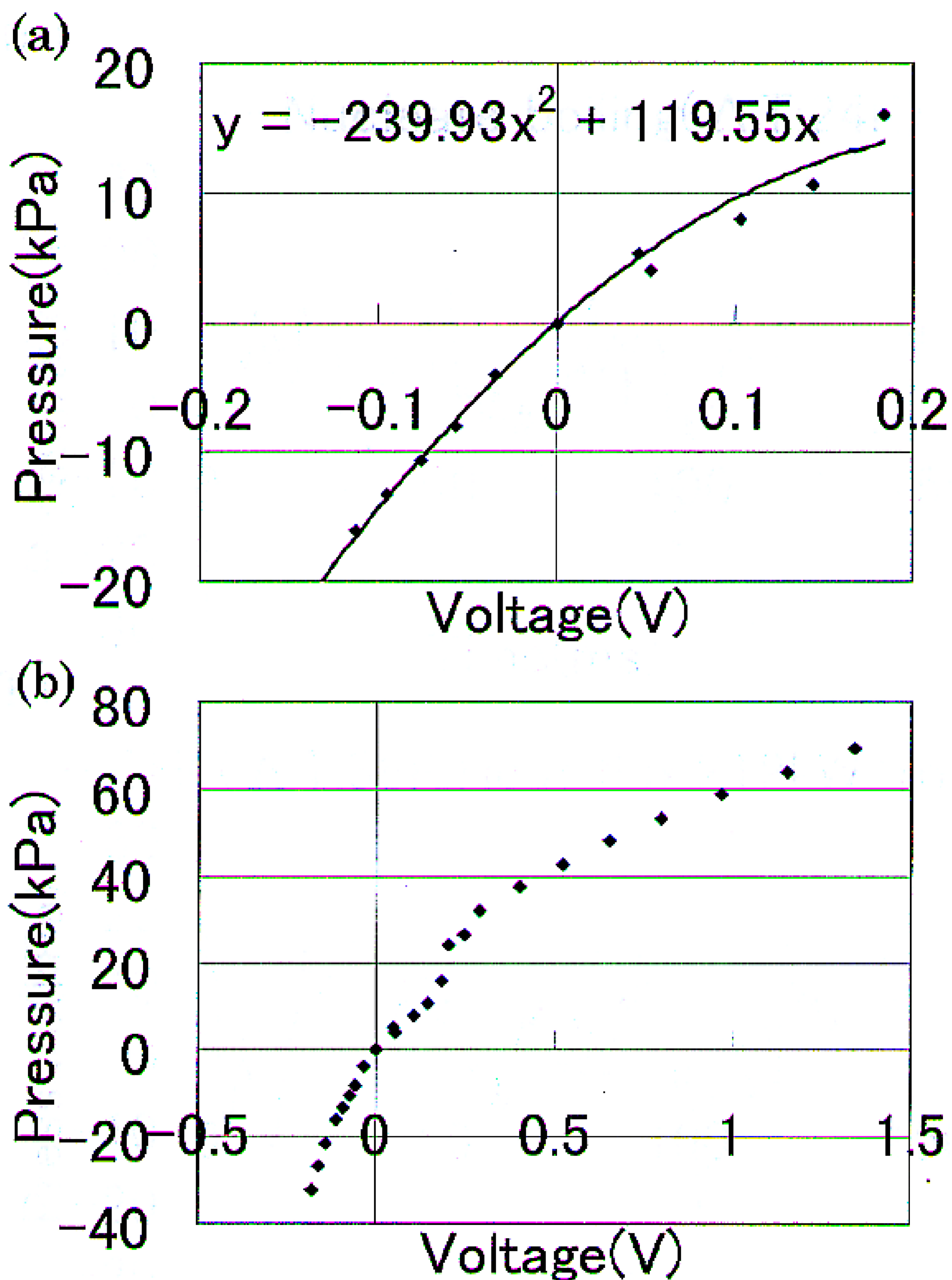


Fig.8 The conversion of voltage to pressure for (a)full scale (b)measuring region

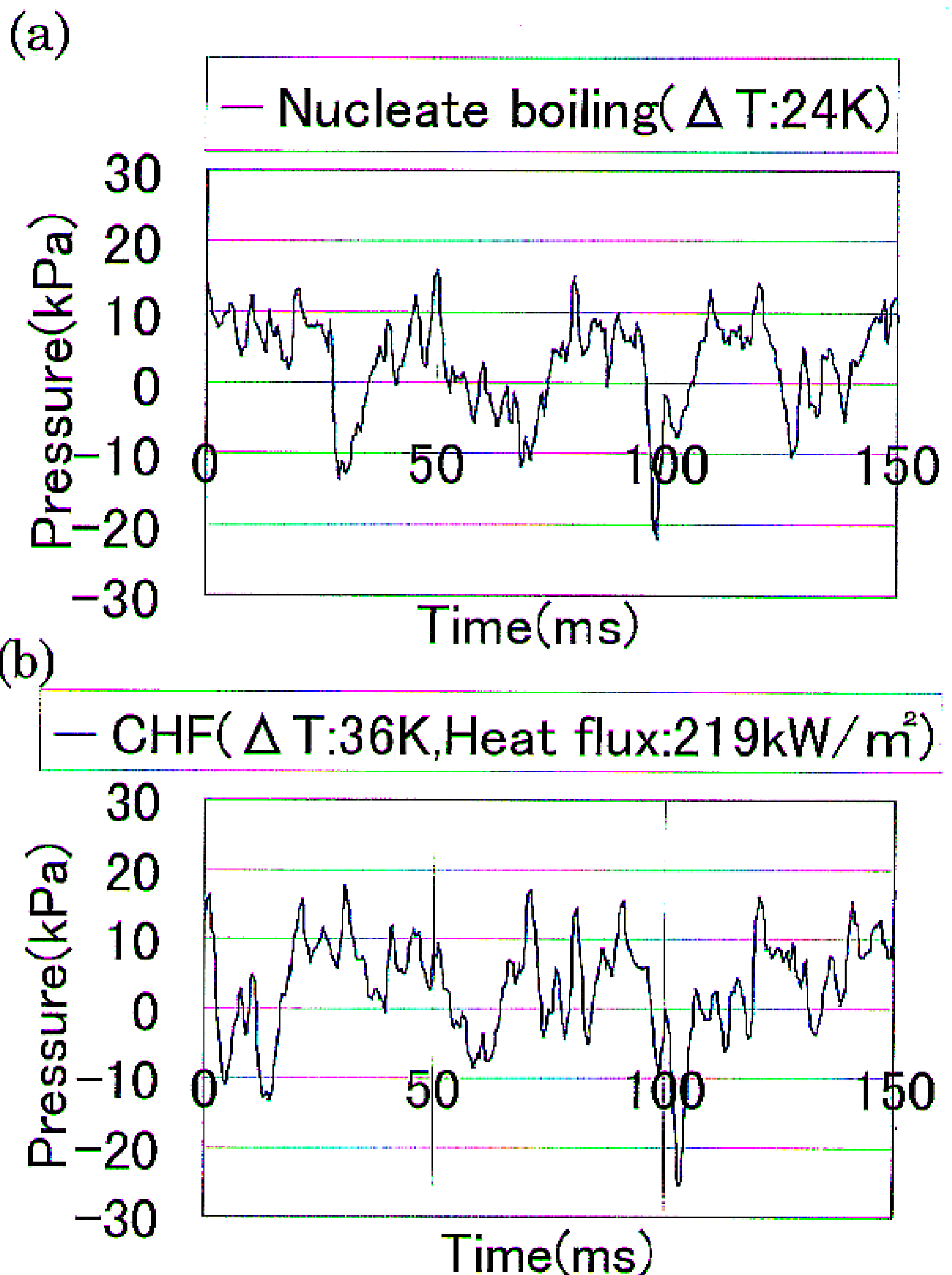


Fig.9 Inner pressure of microlayer as a function of time in (a) Nucleate boiling region (b) CHF

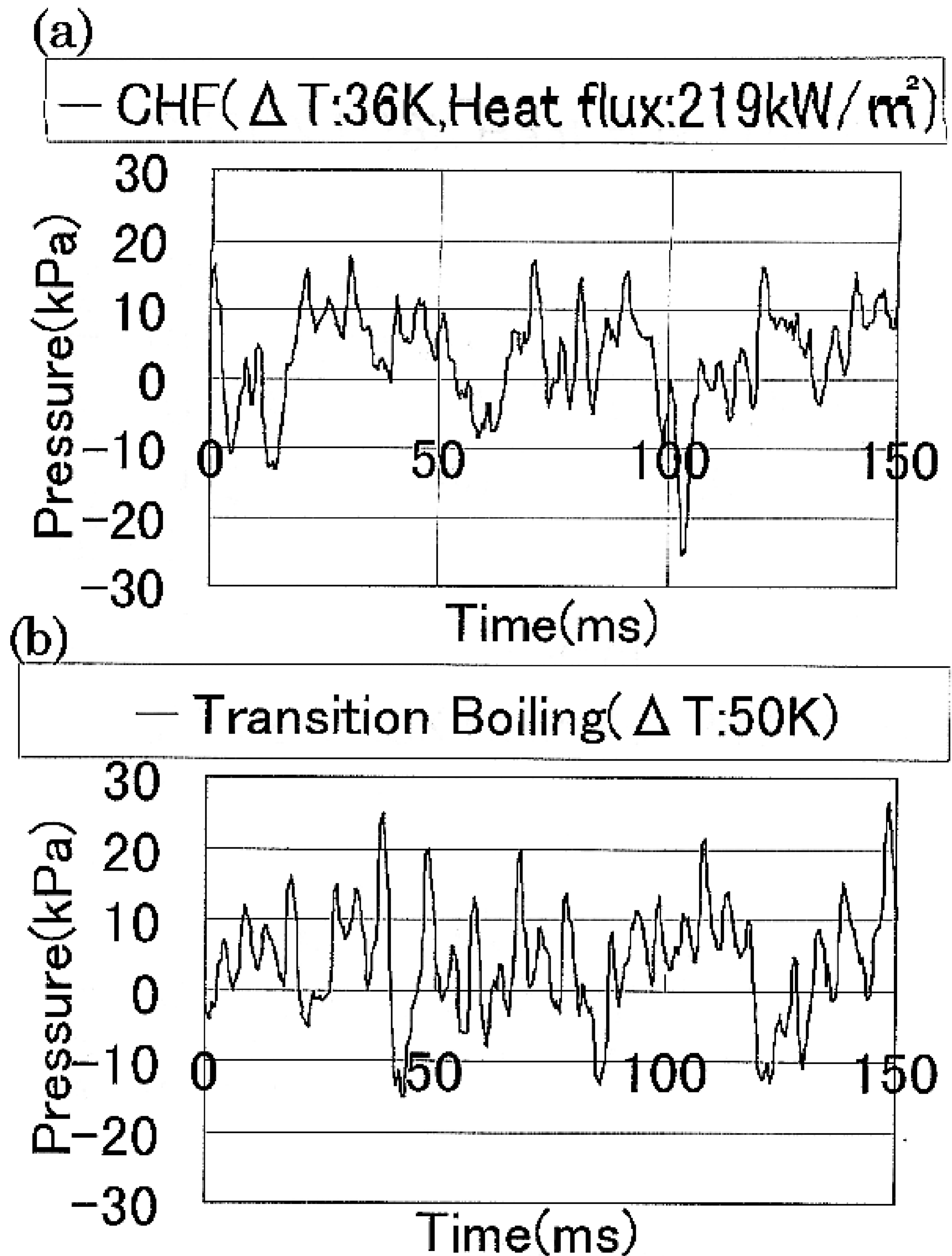


Fig.10 Inner pressure of microlayer as a function of time in (a)CHF (b)Transition boiling region

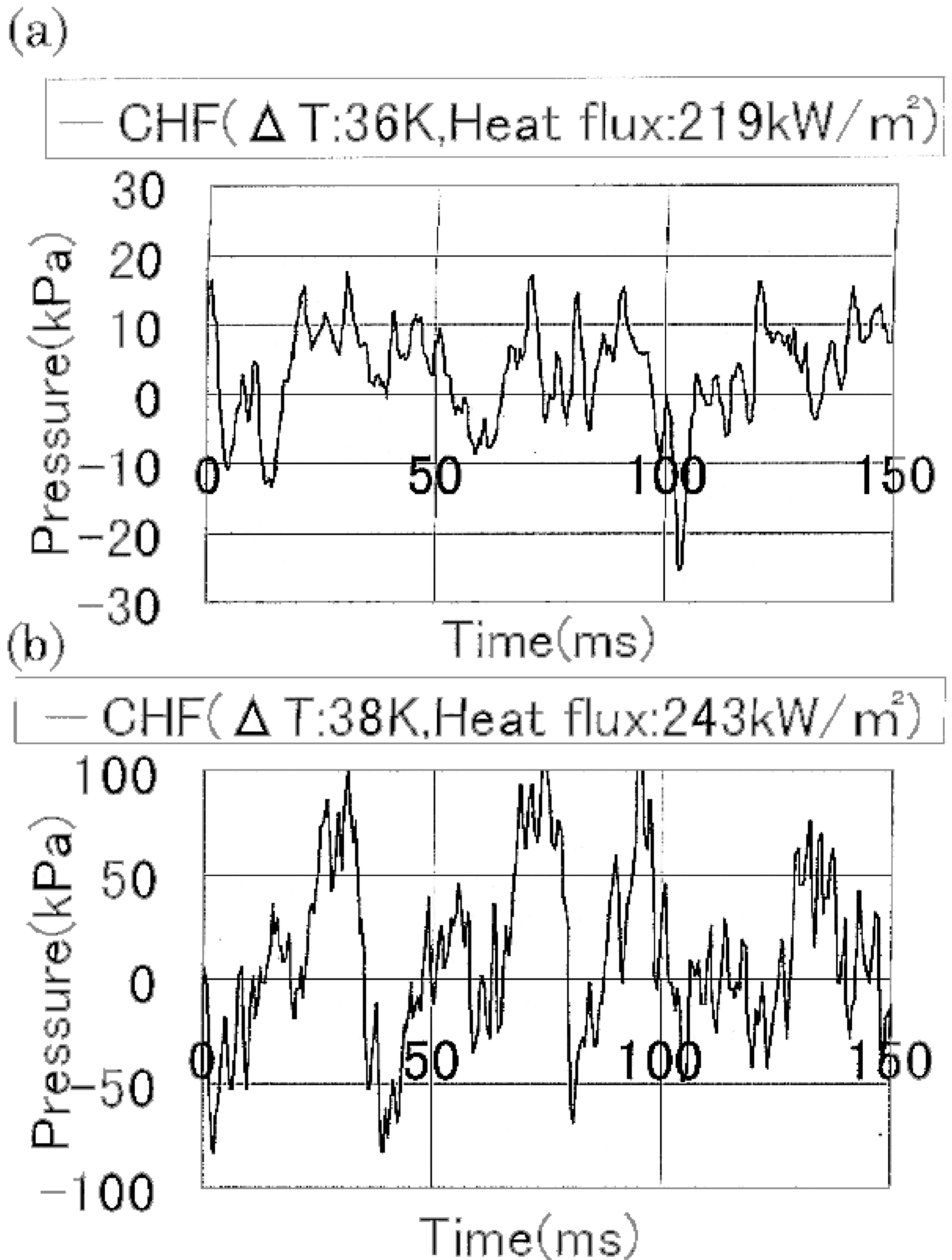


Fig.11 Inner pressure of microlayer as a function of time in CHF at (a)center (b)rim of the heat transfer surface