

InAs 赤外線センサを用いたパワー半導体チップ用 高速温度測定技術についての検討

藤本 宏海* 中道 聡 大村 一郎 (九州工業大学)

High speed temperature measurement with InAs infrared sensor for power semiconductor chips

Hiromi Fujimoto*, Soh Nakamichi, Ichiro Omura (Kyushu Institute of Technology)

Abstract

The performance of the power semiconductors has been improved to realize the high current density operation. The higher current density tends to induce high temperature destruction during short circuit. Although instantaneous temperature analysis is being crucial, most papers only analyzed the temperature by device simulation. In this paper, we try to develop the temperature measurement system with only single shot pulse to unveil the destruction mechanism by instantaneous high temperature.

キーワード：温度測定、赤外線、センサ、InAs

(temperature measurement, infrared, sensor, InAs)

1. はじめに

IGBT をはじめとするパワー半導体は年々導通電流が増加し、性能改善のため薄型化されてきており、熱による破壊に至る時間が短くなってきている。IGBT における熱の温度はチップ内部において μs レベルで数百 $^{\circ}\text{C}$ の温度上昇が起こっていると考えられている⁽¹⁾。一方で、破壊に至る温度上昇は非常に高速で、チップ内部では μm 単位の分布を持つことに対して、実験的な測定での現象の確認が出来ていない。将来、短絡破壊を含む破壊現象の解析やメカニズムの解明には、高速に微細な温度分布を計測するシステムが必要になってくると思われる。

そこで本稿ではパワー半導体の破壊時におけるチップの温度上昇をシングルショットで捉えることのできる温度測定技術の検討を行ったので報告する。まず、基本的な光学検出系を考え設計・素子選定を行い、選定した検出器および光学系を使って測定装置を構成し、現時点での装置のスペックを確認し、チップ断面の温度測定を行った。

2. 測定装置の設計

〈2・1〉 設計目標と赤外線温度測定法の特徴

はじめに破壊現象解析を目的としたパワー半導体の温度測定に求める目標スペックを表 1 に示す。時間分解能は、IGBT の短絡時のエネルギーが $2\text{MW}/\text{cm}^2$ 程度に至り、チップ厚が数十 μm とした場合に 300°C 温度が上昇する時間から算出している。

表 1 温度測定の目標性能

Table 1. Target spec for temperature measurement system.

	Target spec
Time resolution	$1\mu\text{s}$
Spatial resolution	$10\mu\text{m}$
Detectable temperature	around 300°C

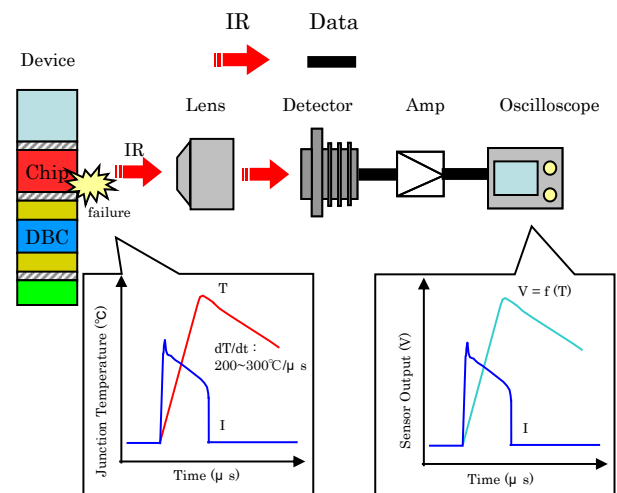


図 1 赤外線による温度測定原理

Fig. 1. Diagram of temperature measurement using IR (Infrared Radiation).

また空間分解能はチップの断面においてある程度の分解能を持つことのできる値で赤外線の波長の数倍の値とした。これらの値は他の文献の値とも一致している⁽²⁾。検出可能温度は IGBT 短絡破壊時に Si チップが 300℃以上になるため最低でもこの値を観測できる必要がある⁽³⁾。本研究では、 μs レベルの応答をシングルショットで実現できる測定方法で比較的使いやすい電子冷却半導体型検出器を用いた赤外線による放射温度測定法を行った⁽⁴⁾⁽⁵⁾。その測定原理を図 1 に示す。赤外線による温度測定の原理は測定対象からの赤外線を光学系に通し検出器で電気信号に変換して温度を測定することができる。赤外線による温度測定は測定対象と非接触で測定ができるという大きな利点を持っている。

表 2 に代表的な半導体型赤外線検出器の種類及び特徴をまとめた(浜松ホトニクス株式会社の技術資料⁽⁶⁾を参考に作成)。検出器は動作モードにより 2 種類に分けられる。一つ目は PV (Photovoltaic mode) 型で素子に入射する赤外線強度に応じた電流が発生する。二つ目が PC (Photoconductive mode) 型で素子に入射する赤外線強度に応じて素子の抵抗値が変化する。通常検出器は感度を上げるため素子を冷却して使用する。今回、取扱いが容易で長時間測定が可能である電子冷却型の素子を候補とした。次に目標スペックの時間分解能、測定可能温度を参考に素子を選定すると InGaAs 検出器、InAs 検出器、InSb 検出器の 3 素子が選定候補として挙げられる。これらの候補を S/N および信号強度を用いて比較を行う。

表 2 半導体型赤外線検出素子の種類⁽⁶⁾

Table 2. Sensor's type and performance.

Sensor	Detectable limit	Rise time order	Cooling
InGaAs (PV*)	200℃	10ns	None, TE-cooled*
PbS (PC*)	100℃	100 μs	None, TE-cooled
InAs (PV)	100℃	100ns	None, TE-cooled, LN*
PbSe (PC)	50℃	10 μs	None, TE-cooled
InSb (PV)	0℃	10ns	LN, Stirling
InSb (PC)	0℃	100ns	TE-cooled
HgCdTe (PC)	-50℃	10 μs	TE-cooled, LN, Stirling

*TE-cooled: Thermoelectric cooled

LN: Liquid Nitrogen

PV: Photovoltaic mode...PV sensor generates photocurrent when IR incidents the detector area

PC: Photoconductive...PC sensor is the resistance which varies by incidented IR

(2・2) 素子選定

InGaAs・InAs・InSb 検出器の算出した S/N を図 2 に示す。300℃付近で比較すると InGaAs 検出器は S/N の変化率が大きく 300℃以下で S/N が極端に減少する。InAs 検出器は 300℃付近で十分な S/N を確保できる。InSb 検出器は S/N の変化率が小さく 100℃付近の測定も可能である。S/N を比較した結果、InSb 検出器と InAs 検出器を選択することになるが、InSb 検出器は低温の物体の影響を受やすく光学的遮蔽などが必須になるため、本研究では InAs 検出器を選定した。

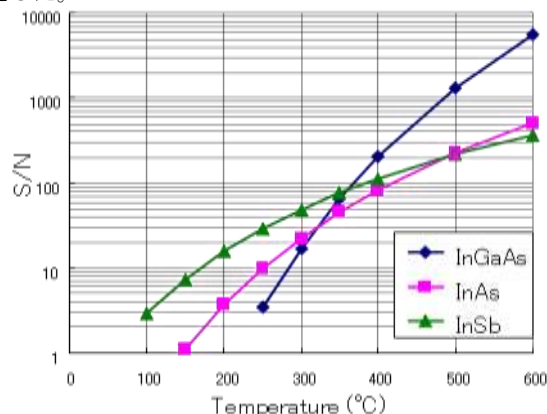


図 2 検出素子別 温度－S/N 関係

Fig. 2. Relation of S/N-temperature using InGaAs, InAs, and InSb sensor.

(2・3) 光学系

光学系は図 3 に示すカセグレン光学系を用いることにした。カセグレン光学系は 2 枚の鏡から構成されている特殊な光学系で、赤外領域で高い伝播性能を持つ。Edmund Optics 社製のカセグレン光学系を用いるとすると、以下のパラメータが決定される。

使用モデル：金コート反射型対物レンズ (NT58-422)

パラメータ： τ ; 0.97, ω ; 0.2, 開口数 ; 0.28, 倍率 ; 15
焦点距離 ; 13.3mm, 筒長距離 ; 160mm,

センサの受光面が図 3 のように円形の場合、レンズが観測する面も円形となりその直径は受光面の直径を倍率で割った値となる。この関係からセンサが観測する放射面積を求められる。

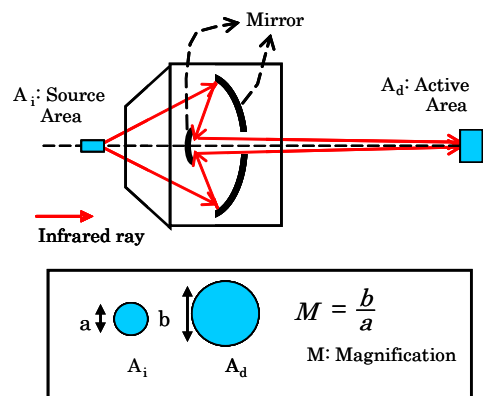


図 3 カセグレン光学系

Fig. 3. Cassegrain reflector.

3. システムの概要と構築

この節では設計を行った検出器を用いたシステムの概要を説明する。図 4 に本研究で構成したシステムの概略図を示す。本研究のシステムは自動ステージ上に検出器, レンズを設計することでターゲットとするデバイスを固定したまま温度測定が可能であるという利点を持っている。

ステージの移動は PC からステージコントローラ(シグマ製 SHOT-202)を通して自動ステージに信号を送り XY 方向に $2\mu\text{m}$ 単位で移動が可能となっている。また、オシロスコープからの出力データも同一の PC で処理することが可能となっており、自動ステージの操作と出力データの取得を連動して行うことができる。測定対象への焦点合わせは Z 方向の手動のステージを用いて行っている。今回構成したシステムの構成写真とステージの写真をそれぞれ図 5,6 に示す。

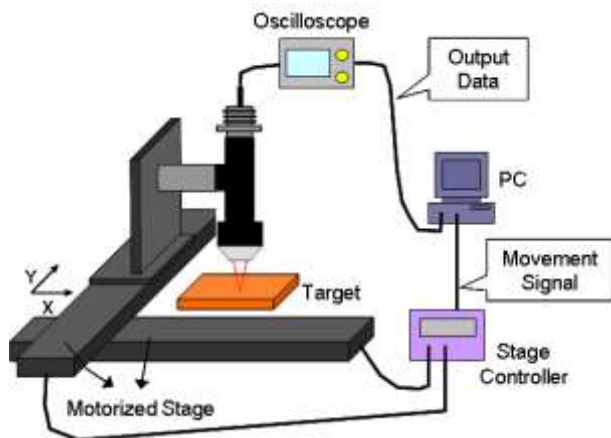


図 4 システムの概略
Fig. 4. Outline of the system.

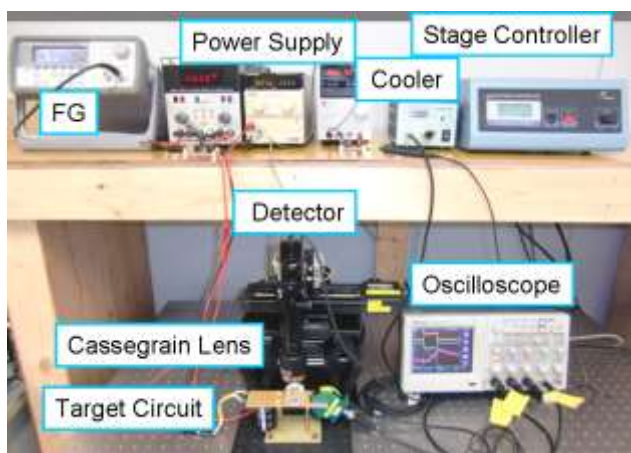


図 5 システムの構成写真
Fig. 5. Photograph of the system.



図 6 ステージの写真
Fig.6. Photograph of the stage.

4. InAs 検出器の実験による確認

この節では InAs 検出器および光学系のモデルを使って装置を構成し、装置の設計値の温度-出力関係、空間分解能、過渡温度について実験を行った。

〈4・1〉 設計の確認

測定対象の表面温度と検出器からの出力の関係について、設計値と実験値を比較する。図 7 にその実験方法と測定結果を示す。熱源には平面状のヒータを用いその表面温度を熱電対で測定する。その時の InAs 検出器の出力電流を測定した。比較の結果、設計値に近い温度-出力関係を得る事ができた。

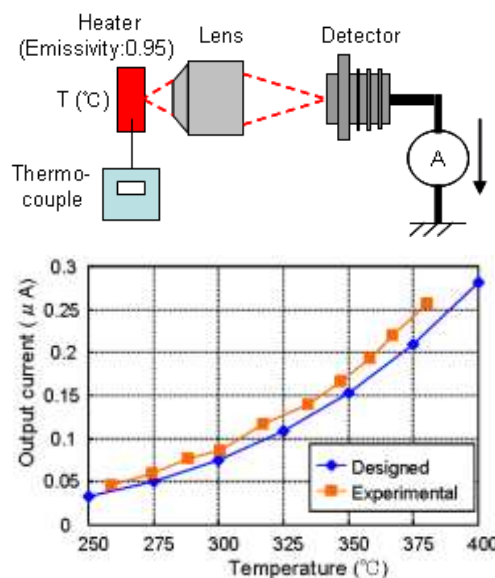


図 7 設計の確認
Fig. 7. Result of designed value.

〈4・2〉 空間分解能実験

空間分解能実験では観測している範囲(スポット)が設計値と一致するかを実験的に確認する。設計した InAs 検出器の受光面は直径 1mm、レンズの倍率は 15 倍なのでレンズの公式により理論上のスポット径はおよそ 70 μ m となる。実験方法を図 8 に示す。今回ヒータとレンズ間に 50・100 μ m のスリットを用いて、スリットの位置に対する出力の変化から分解能を確認した。実験原理は図 8 下図のようにスリット幅が観測している範囲より大きい場合、出力が一定となる状態が存在する(図 8(a)の状態)。一方、スリット幅が観測している範囲より小さい場合、常にスポットが欠ける状態なので出力が弱まる(図 8(c)の状態)。

検出器の出力が最大となる位置を基準点として、その基準点から上下に移動させ出力が 0 になる位置まで移動させデータをプロットし、その実験結果を図 9 に示す。スリット 100 μ m にだけ基準点付近の位置で最大値の一定の出力が得られた。その範囲がおおよそ 30 μ m であり、これはスリットサイズ(100 μ m)とスポットサイズ(70 μ m)の差であると考えられ、設計通りの空間分解能が確認できた。

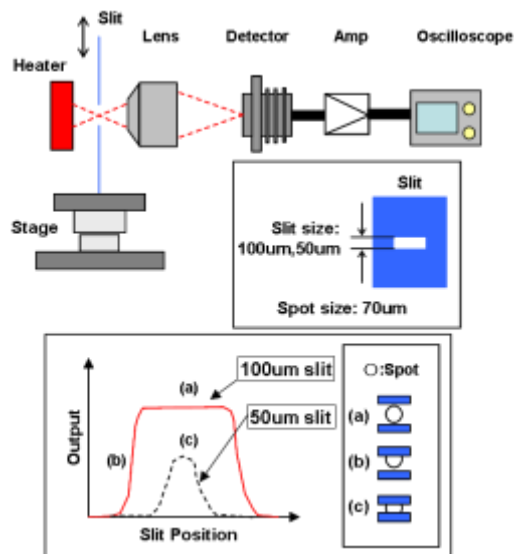


図 8 空間分解能実験

Fig. 8. Spatial resolution test.

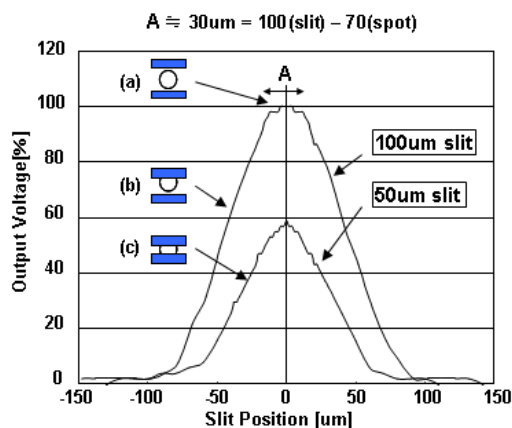


図 9 空間分解能実験結果

Fig. 9. Result of spatial resolution test.

〈4・3〉 過渡温度測定実験

過渡温度測定実験では測定対象物に瞬間的にエネルギーを加え、その過渡温度をどの程度速く測定できるかを確認する。図 10 に実験方法,実験回路図を示す。測定対象物はダイオード(東芝製、表面実装用ダイオード CMG06)を用いて、チップ断面が露出するように切断し研磨加工を施しており、断面写真を図 11 に示す。図 11 の左図はエポキシ樹脂で硬化した実際の素子の写真で、右図は断面の拡大写真である。チップの寸法は縦 200 μ m 横 1000 μ m となっており、図のような形状をしている。また、ダイオード(CMG06)の規格はデータシートより表 3 の通りである。実験は回路中の IGBT によりダイオードに定格電流よりはるかに大きい電流を順方向に瞬間的に流すことでダイオードを発熱させ、その温度を InAs 検出器で測定してシステムの時間的分解能の確認を行った。

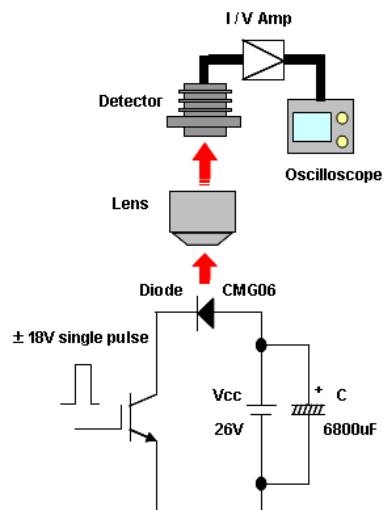


図 10 ダイオードの過渡温度実験

Fig. 10. Transient temperature test of a diode.

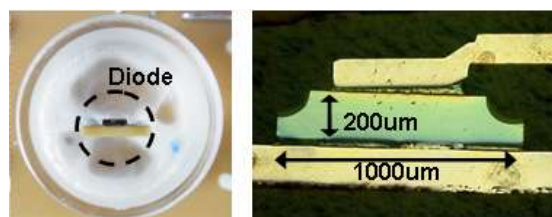


図 11 ダイオードの断面写真

Fig.11. The cross-sectional photograph of the diode.

表 3 ダイオード(CMG06)の規格

Table 3 Standard of the diode (CMG06).

Characteristics	Symbol	Rating	Unit
Repetitive peak reverse Voltage	V_{RRM}	600	V
Average forward current	$I_{F(AV)}$	1.0	A
Non-repetitive peak surge current	I_{FSM}	15(50Hz)	A
Junction temperature	T_j	-40~150	°C
Storage temperature	T_{stg}	-40~150	°C

図 12 に最高温度点の実験結果の出力波形を示す。ゲートの入力パルス幅(30 μ s)が入力されている間にダイオードには 200A もの電流が流れダイオードが発熱し、検出器からの出力電圧は温度変化に反応した挙動を示しており最大出力 60mV が確認できる。このとき、出力電圧の急峻が顕著に確認できており、5 μ s 程度の時間分解能を持つことが予測できる。

また、ダイオードの面積(縦 200 μ m 横 1000 μ m)を検出器の縦横 70 μ m 四方のスポットで縦 5 点、横 13 点の計 65 分割し、図 12 においてゲートが ON してから(a)から(g)の時間の熱分布画像の作成を行った。図 13 は(a)から(g)の範囲の各時間の熱分布画像である。この熱分布画像より時間経過とともにダイオードの発熱・放熱が確認でき、熱の分布と最大到達温度がおおよそ 290 $^{\circ}$ Cであることを確認できた。

熱分布画像の観測温度の下限が 150 $^{\circ}$ Cであるのは InAs 検出器の波長による感度域の下限であり、今回設計した InAs 検出器では 150 $^{\circ}$ C以下は観測できない。そのため、図 12 の(a)(b)間は出力電圧としては現れていないが、常温から 150 $^{\circ}$ Cまでの発熱が起きていると言える。

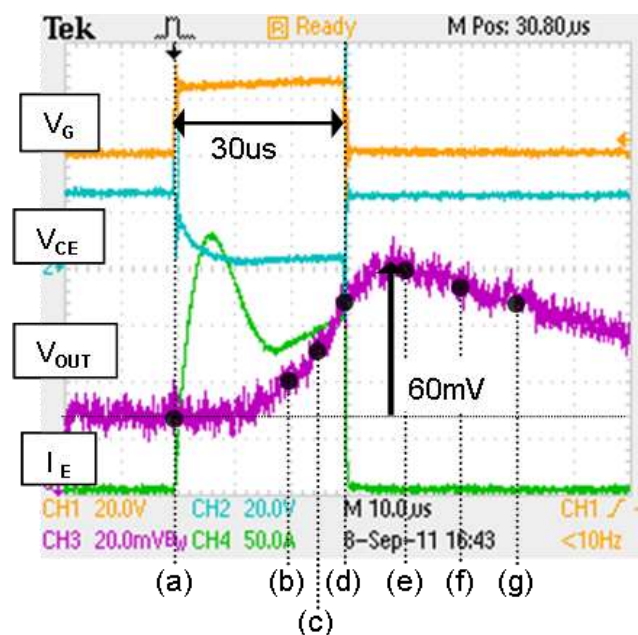


図 12 検出器出力波形結果

Fig. 12. Waveform of sensor output at transient temperature test.

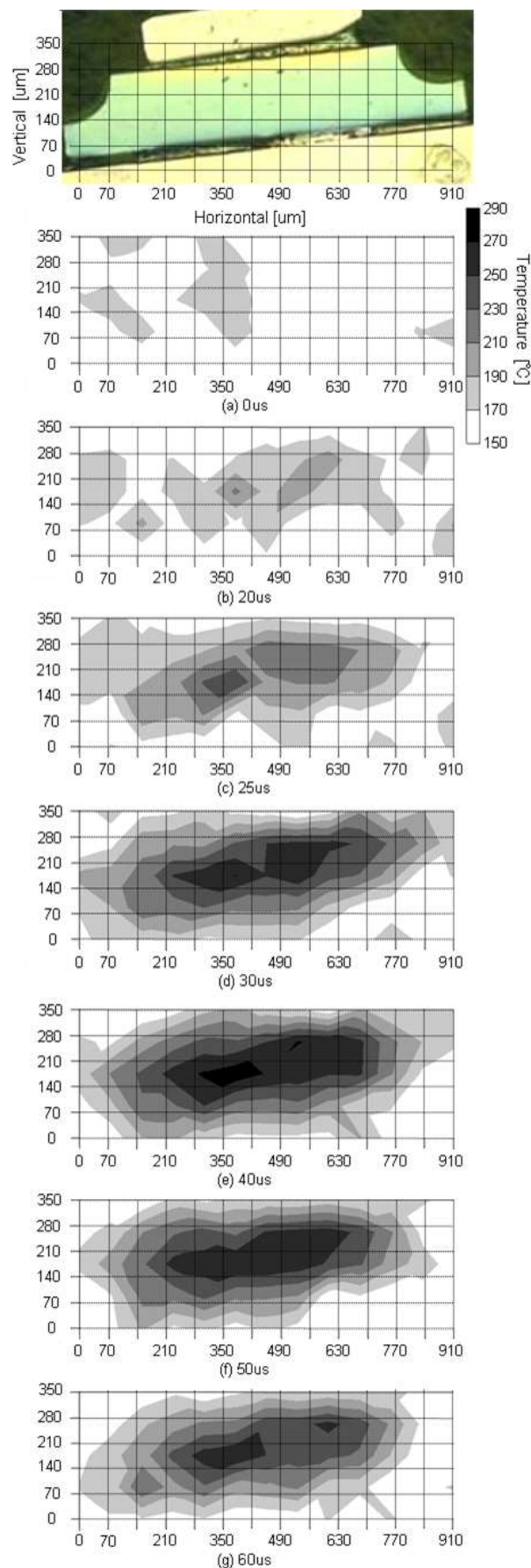


図 13 熱分布画像

Fig. 13. Temperature distribution graphics.

5. 今後の課題

今後の課題として、まず本稿で述べた空間分解能と時間分解能の目標スペックまでの高性能化が挙げられる。またシステムを実現ための課題として次に課題点を示す。

・ノイズの除去

出力信号のノイズにより温度に換算すると 20℃程度の影響が考えられるため、安定した温度測定にはさらなるノイズの除去が必須である。

・検出器のアレイ化

今回の実験では赤外線素子が単素子のため複数回の入力により熱分布画像を取得したが、IGBT などの実際の素子では検出器をアレイ化し一度の破壊現象を捉える必要がある。

・破壊からの装置保護

本研究では定格電流の低いダイオードを用いて、素子の発熱を捉えてきたが、今後 IGBT などのパワーデバイスの破壊現象を捉えるためには高電圧・大電流を扱うためシステム装置を破壊から保護する対策が出てくると思われる。

6. 結論

本稿では、パワー半導体の破壊現象を解析するための温度測定装置設計の S/N による検出器選定方法を示した。また設計で想定した検出器と光学系で装置を構成し(1) 設計確認、(2) 空間分解能の確認、(3) 過渡温度測定実験について述べた。

今回の実験では目標スペックにはいたらなかったが、設計方法が確認され、空間分解能が 70 μ m と時間分解能が 5 μ s まで確認することができた。また、現在のシステムの性能によりダイオードの熱分布画像を確認することができ、InAs 赤外線検出器による破壊解析を目的とした高速温度測定技術の有効性を確認することができた。

今後、目標スペックの実現に向け、課題を解決してゆく。

numerical simulation of new cellular power MOS affected by electro-thermal instability”, Microelectronics Journal, Vol.31, pp.741-746 (2000)

- (6) 浜松ホトニクス株式会社技術資料: “特性と使い方(赤外線検出素子)”
- (7) Richrad D. Hudson, Jr. : “Infrared system engineering”, p418, John Wiley(1969)

文 献

- (1) Z.John Shen and I.Omura: “Power Semiconductor Devices for Hybrid, Electric, and Fuel Cell Vehicles”, proceedings of the IEEE, Vol.95, No.4, pp.778-789 (2007-4)
- (2) M.Otsuki, Y.Onozawa, H.Kanemura, Y.Seki, and T.Matsumoto: “A Study on the Short-Circuit Capability of Field-Stop IGBTs”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.50, No.6, pp.1525-1531 (2003-6)
- (3) J.Yamashita, A.Uenishi, Y.Tomomatsu, H.Haruguchi, H.Takahashi, I.Takata, and H.Hagino: “A Study on the Short Circuit Destruction of IGBTs”, ISPSD’93 pp.35-40 (1993-5)
- (4) G.Breglio, A.Irace, P.Spirito, R.Letor, and S.Russo: “Fast transient infrared thermal analysis of smart Power MOSFETS in permanent short circuit operation”, proceedings of the ISPSD’06 (2006-06)
- (5) G.Breglio, N.Rinaldi, P.Spirito: “Thermal mapping and 3D