

## 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

著者	中道 聡, 藤本 宏海, 大村 一郎
雑誌名	電気学会研究会資料. EDD, 電子デバイス研究会
巻	EDD - 10
ページ	EDD - 10 - 116
発行年	2010-10
その他のタイトル	High speed temperature measurement with InAs infrared sensor for power semiconductor chips
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10228/5796">http://hdl.handle.net/10228/5796</a>

# 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

中道 聡\* 藤本 宏海 大村 一郎 (九州工業大学)

High speed temperature measurement with InAs infrared sensor for power semiconductor chips  
Soh Nakamichi\*, Hiromi Fujimoto, Ichiro Omura (Kyushu Institute of Technology)

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. まえがき

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いる。導通電流の増加に伴い、IGBTでは短絡時に流れる電流が大きくなる傾向があり、チップの薄型化による熱容量が低下とあいまって破壊に至る時間が短くなってきている<sup>(1)</sup>。チップ内部では $\mu\text{s}$ レベルで数百 $^{\circ}\text{C}$ の温度上昇が起こっており、制御により短時間で保護する方法も検討されている。一方で、破壊に至る温度上昇が非常に高速で、チップ内部ではミクロン単位の分布を持つため、実験的な測定での現象の確認が出来ていない。今後短絡破壊を含む破壊現象の解析やメカニズムの解明では、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。まず基本光学-検出系を考え、設計、素子選定を行った。選定した検出器および光学系を使って測定装置を構成、装置の性能を実験的に確認した。

## 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

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値を表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 $\mu\text{m}$ とした場合に $300^{\circ}\text{C}$ 温度が上昇する時間から算出した。また空

表1 温度測定の目標値

Table 1 Target of temperature measurement system

	目標値
時間分解能	1 $\mu\text{s}$
空間分解能	10 $\mu\text{m}$
検出可能温度	300 $^{\circ}\text{C}$ 付近

間分解能はチップの厚さ方向である程度の分解能をもてる値で、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<sup>(2)</sup>。検出可能温度は破壊時にSiチップが $300^{\circ}\text{C}$ 以上になるためこの値を最低でも観測できる必要がある<sup>(3)</sup>。現在 $1\mu\text{s}$ 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方法は、電子冷却半導体型検出器を用いた放射温度測定法である<sup>(4)(5)</sup>。その測定原理を図1に示す。測定対象からの赤外線を光学系を通し検出器で電気信号に変換する。変換された信号を増幅回路で処理しオシロスコープで測定する。オシロスコープで捉えた検出器の出力信号(時間変化)を元に、温度変化を捉えることができる。

代表的な半導体型赤外線検出器の種類及び特徴を表2にまとめた(浜松ホトニクス株式会社の技術資料<sup>(6)</sup>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)型で赤外線が検出器に入射すると赤外線の放射強度に応じた電流が発生する。二つ目はPC(Photoconductive)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減少する。赤外線検出器は一般に雑音を

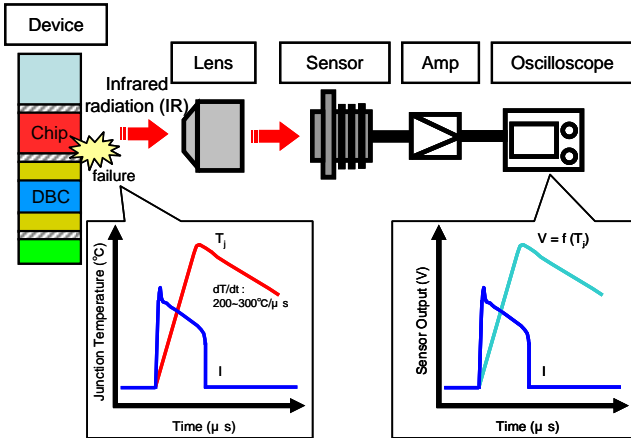


図1 赤外線による温度測定原理

Figure 1 Diagram of temperature measurement using IR (infrared radiation) sensor

減らして感度を上げるため冷却して使用する。冷却方法はペルチェ効果を利用した電子冷却 (TE-cooled)、液体窒素による冷却、機械 (スターリング) 冷却の 3 つがある。電子冷却は取扱いが容易で長時間測定が可能だが冷却性能が低い。液体窒素は冷却性能が高いが長時間の測定が不可能である。機械冷却は冷却性能が高く長時間の測定も可能だが高価な上、冷却器が大型化し寿命が短い。今回は扱いやすさを優先して電子冷却型の素子を候補とした。次に目標値の時間分解能、検出可能温度を表 2 と比較すると、InGaAs 検出器、InAs 検出器、InSb 検出器の 3 素子が選定候補となった。これらの候補を S/N および出力信号強度で比較して素子を選定する。検出器は素子内部で発生する固有雑音を持っており、素子の検出可能な下限温度は出力信号と固有雑音の比で決定される。雑音値と検出器の出力値が一緒になる時、つまり S/N が 1 になる時の温度が検出可能な下限温度となる。また出力信号の大きいことも、その後のアナログ回路の性能上重要である。以下に S/N および出力信号強度を導出する方法を述べる。

〈2・2〉 光学系を含めた S/N の計算式導出

この節では検出器は PV 型を仮定する。PC 型でも同様の式になるためここでは省略する。まず出力信号を求める。検出系を設計するために、図 2 のような光学-検出系を仮定する。測定面の温度を  $T$  としたとき、検出部に到達する放射エネルギーによる出力電流  $i_s$  は式(1)で与えられる (式(1)は文献(7)(8)を元に導出した)。式(1)中の  $A_i$  は被観測放射面積 ( $cm^2$ )、 $\omega$  は  $A_i$  からみてレンズが張る立体角 ( $sr$ )、 $\lambda$  は赤外線の波長 ( $\mu m$ )、 $\varepsilon(\lambda)$  は測定面の放射率、 $\tau(\lambda)$  は光学系や大気の透過率、 $R(\lambda)$  は検出器の感度 ( $A/W$ )、 $L(T, \lambda)$  は対象物が放射する波長当りの赤外線の強度 ( $W/cm^2 / \mu m/sr$ ) を表している。

$$i_s = A_i \omega \int \varepsilon(\lambda) \tau(\lambda) R(\lambda) L(T, \lambda) d\lambda \dots\dots\dots(1)$$

(PC 型の場合出力信号および感度の単位が電圧になる)

表 2 半導体型赤外線検出素子の種類<sup>(6)</sup>

Table 2 Sensor's type and performance

検出器	検出下限 目安温度	立上り 時間	冷却方法
InGaAs (PV*)	200°C	10ns	None, TE-cooled*
PbS (PC*)	100°C	100μs	None, TE-cooled
InAs (PV)	100°C	100ns	None, TE-cooled, LN*
PbSe (PC)	50°C	10μs	None, TE-cooled
InSb (PV)	0°C	10ns	LN, Stirling
InSb (PC)	0°C	100ns	TE-cooled
HgCdTe (PC)	-50°C	10μs	TE-cooled

\*TE-cooled: Thermoelectric cooled ペルチェ効果を利用した冷却

LN: Liquid Nitrogen 液体窒素を使った冷却

PV: Photovoltaic 赤外線が入射すると電流が発生

PC: Photoconductive 赤外線が入射すると検出器の抵抗値が減少

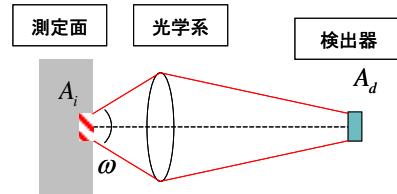


図2 設計に用いた光学-検出系モデル

Figure 2 Model of optics-sensor system

放射率や大気の吸収、光学系の透過率などの波長依存性を無視できる場合には、式(2)のように簡単化できる。

$$i_s = A_i \omega \varepsilon \tau \int R(\lambda) L(T, \lambda) d\lambda \dots\dots\dots(2)$$

式(2)の信号強度をアナログ回路で増幅する (図 3)。1 μs レベルの時間分解能を実現するためここでは通常に比べて大きい 1MHz の帯域幅 Δf を仮定する。一方で Δf が大きくなると、検出器内部の雑音が増加する傾向にある。

2.1 節で述べた検出器内部の雑音  $i_n$  を求める。雑音  $i_n$  (概算値) は NEP (Noise Equivalent Power : S/N が 1 になるときの入射光強度 ( $W/\sqrt{Hz}$ )) を用いて式(3)で与えられる。式(3)中の  $R_{peak}$  は検出器の最大感度を示す。

$$i_n = NEP \cdot R_{peak} \sqrt{\Delta f} \dots\dots\dots(3)$$

(PC 型の場合ノイズおよび最大感度の単位が電圧になる)

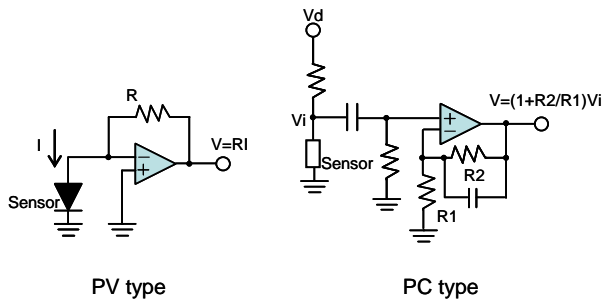


図3 増幅回路  
Figure 3 Preamplifier circuit

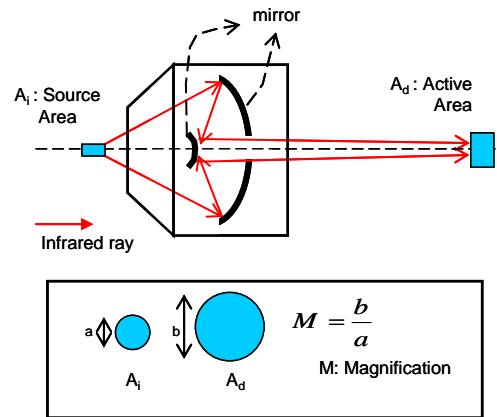


図4 カセグレン光学系  
Figure 4 Cassegrain reflector

式(2)、(3)より S/N は次式で求められる。

$$S/N = \frac{i_s}{i_n} = \frac{A_i \omega \epsilon \tau \int R(\lambda) L(\lambda, T) d\lambda}{NEP \cdot R_{peak} \sqrt{\Delta f}} \dots\dots\dots(4)$$

(2・3) 光学系

レンズとしてカセグレン光学系を用いる (表 3)。カセグレン光学系は図 4 のように 2 枚の鏡から構成される光学系で、広い波長域で高い伝播性能を持つ。

(2・4) 素子選定

S/N 計算に使用した検出器の型番と仕様を表 4 に示す。表 4 中の  $A_i$  は表 3 の光学系を用いた場合の被観測放射面積で、式(5)で与えられる。 $A_d$  は検出器の受光面積を表す。

$$A_i = \frac{1}{M^2} A_d \dots\dots\dots(5)$$

次に式(2)を用いて出力信号の強度を求める。式(2)中の出力信号  $i_s$  の波長に関する積分は検出器のデータシート上の  $R(\lambda)$  を用いて行った。表 5 に 300℃における出力信号を示す。ただし InSb 検出器は電圧出力のため、出力電圧を検出器に赤外線が入射していない時の検出器の抵抗  $R_d$  で割った値で電流値を導出して比較した。信号強度は InSb 検出器が最も大きく、InGaAs 検出器が最も小さく、InAs 検出器はその中間となった。

次に式(4)を用いて S/N を求めた。その結果を図 5 に示す。InGaAs 検出器は 300℃付近で S/N が極端に減少する。InAs

表 3 カセグレン光学系の仕様

Table 3 Cassegrain reflector model and specification

メーカー	エドモンドオプティクス
製品型番	NT58-422
反射率 $\tau$	97% ( $\lambda$ : 1 ~ 10 $\mu$ m)
開口数	0.28
焦点距離	13.3mm
筒長	160mm
倍率 M	15
立体角 $\omega$	0.2sr

表 4 検出器の仕様

Table 4 Sensor model and specification

	InGaAs	InAs	InSb
製品型番	G8605-21	P10090-21	P6606-310
動作モード	PV	PV	PC
立上り時間	0.02 $\mu$ s	0.3 $\mu$ s	0.4 $\mu$ s
受光面積 $A_d$	$\phi$ 1mm	$\phi$ 1mm	1×1mm
被観測放射面積 $A_i$	$\phi$ 70 $\mu$ m	$\phi$ 70 $\mu$ m	70×70 $\mu$ m
NEP	$3 \times 10^{-15}$ $W/\sqrt{Hz}$	$2.8 \times 10^{-12}$ $W/\sqrt{Hz}$	$1 \times 10^{-11}$ $W/\sqrt{Hz}$
$R_{peak}$	0.95 A/W	1.2 A/W	650 V/W
感度波長域	0.9 ~ 1.65 $\mu$ m	1.2 ~ 3.5 $\mu$ m	2.0 ~ 6.3 $\mu$ m
冷却温度	-20℃	-30℃	-60℃
暗抵抗 $R_d$	--	--	80 $\Omega$

表 5 300℃における設計出力値

Table 5 Calculated output at 300℃

	InGaAs	InAs	InSb
出力信号 (300℃)	200pA	93nA	0.4mV* (5 $\mu$ A)

\*InSb 検出器は出力が電圧のため、InGaAs 検出器、InAs 検出器と強度の比較が出来ない。そこで出力電圧を暗抵抗 (赤外線が入射しない時の検出器の抵抗値) で割った値を PV 型で発生する同等の電流と考えた。その値は 5 $\mu$ A となる。

検出器は 300℃付近で十分な S/N を確保できる。InSb 検出器は 300℃付近で最も大きな S/N を確保できる。300℃付近の S/N は InSb 検出器が最も大きく、InGaAs 検出器は最も小さく、InAs 検出器はその中間となった。

以上から出力信号、S/N の両面から InSb が最も良好な結果となった。一方で InSb 検出器は数十℃程度の温度を持つ物体の影響を受けやすく光学的遮蔽などが大掛かりになること、及び価格帯を考慮し今回は InAs 検出器を用いて実験による検証を行った。

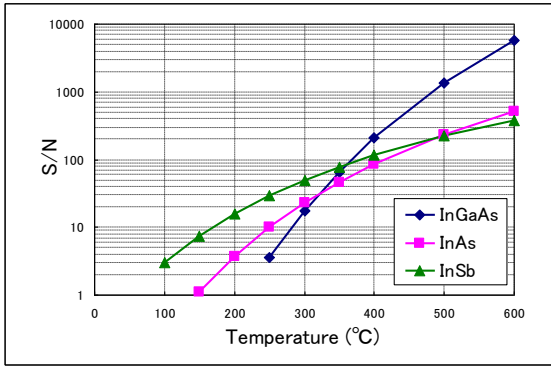


図5 検出素子別に見た S/N-温度関係

Figure 5 S/N dependence to temperature for InGaAs, InAs, and InSb sensor

### 3. InAs 検出器による測定装置の設計と実験による確認

前節で選定した InAs 検出器とカセグレン光学系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。

#### 〈3・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 6 にその試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。

#### 〈3・2〉 空間分解能実験

設計上のスポット径（被観測面の直径）が実験的に一致

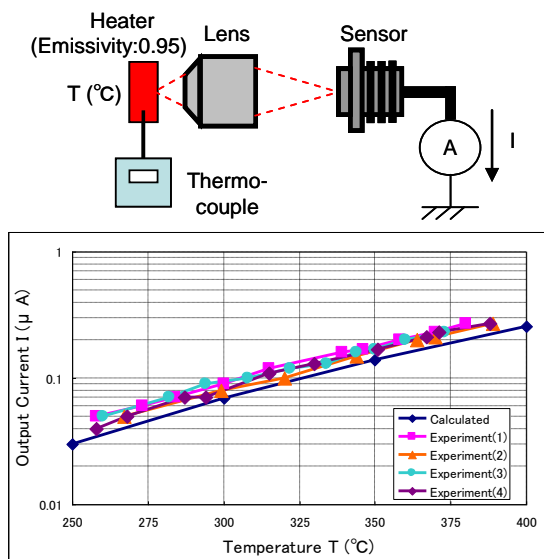


図6 設計の確認

Figure 6 Calculated output and experiment result

するか確認する。図 7 にその実験方法を示す。ヒータとレンズとの間にスリットを入れ検出器の出力が最大となる点を基準点とし、その点からスリットを  $10\mu\text{m}$  刻みで移動させる。焦点はスリットに合わせる。スリットのサイズがスポット径より大きい場合、出力が一定の状態が存在する(図 7 中の赤線(a))。一方スリットのサイズがスポット径より小さい場合、常にスポットが欠けて出力が弱まる(図 7 中の黒破線(c))。このように、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。設計上のスポット径は表 4 より約  $70\mu\text{m}$  となる。 $70\mu\text{m}$  より大きいスリットとして  $100\mu\text{m}$ 、小さいものとして  $50\mu\text{m}$  を選び実験を行った。実験結果を図 8 に示す。 $100\mu\text{m}$  のスリットでは基準点付近の位置で最大値と同じ出力を得られた。そのエリアが  $30\mu\text{m}$  となり、これはスリットのサイズ  $100\mu\text{m}$  とスポット径  $70\mu\text{m}$  の差であると考えられる。 $50\mu\text{m}$  のスリットでは最大値を頂点に山なりの出力値となった。以上より設計通りのスポット径が観測できていることが確認できた。

#### 〈3・3〉 過渡温度実験

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速くかつ正確に測定できるか確認する。図 9 に実験方法を示す。測定対象物はニクロム線を用い、回路中の IGBT により瞬間的にニクロム線にエネルギーを与える。そのエネルギーによりニクロム線の温度が急激に上昇する。ニクロム線の温度が最大となる点を InAs 検出器の出力から読み取った温度と電流により計算した温度で比較する。温度の計算方法は式(6)の発熱量と熱容量の関係式より求める。式(6)中の  $J$  はニクロム線に与えられる単位長さ当りのエネルギー ( $J/\text{cm}$ )、 $C$  はニクロム線の単位長さ当りの熱容量 ( $J/\text{cm}/\text{C}^\circ$ )、 $T_0$  は定常時のニクロム線の温度 ( $\text{C}^\circ$ )、 $\rho(T)$  は温度係数を考慮したニクロム線の体積抵抗率 ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )、 $I(t)$

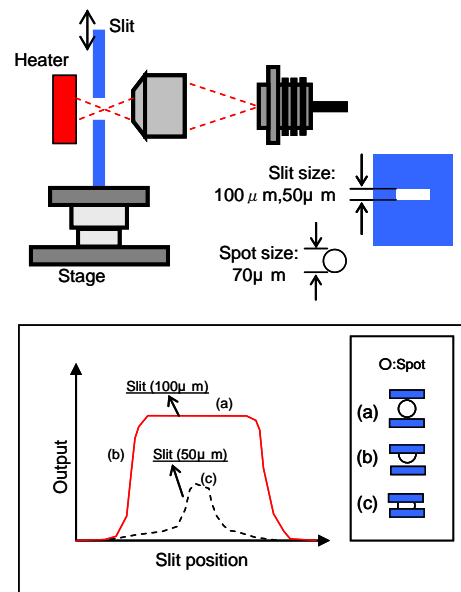


図7 空間分解能実験方法

Figure 7 Spatial resolution experiment method

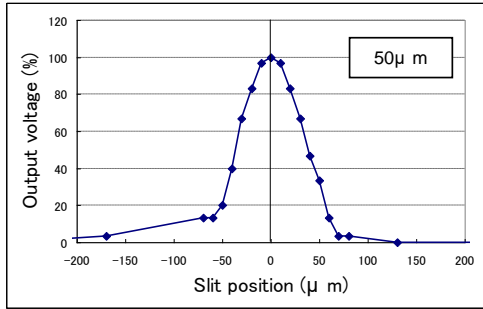
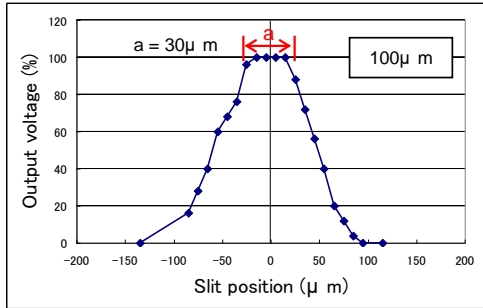


図 8 空間分解能実験結果

Figure 8 Result of spatial resolution experiment

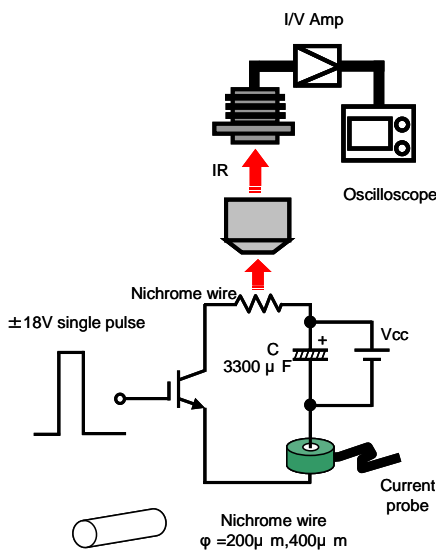


図 9 過渡温度実験方法

Figure 9 Transient temperature experiment method

はニクロム線を通る電流 ( $A$ )、 $c$  はニクロム線の比熱 ( $J/g/K$ )、 $d$  はニクロム線の密度 ( $g/cm^3$ )、 $A(T)$  は熱膨張を考慮したニクロム線の断面積 ( $cm^2$ ) を示す。

$$T = \frac{J}{C} + T_0 = \frac{\rho(T) / A(T) \int I^2(t) dt}{c \cdot d \cdot A(T)} + T_0 \dots\dots\dots (6)$$

式(6)は単位長さ当りの発熱量と熱容量を用いることで、電流のみの測定で温度を計算できる。計算では  $T_0 = 20C^\circ$  とした。図 10 に試験時の測定装置の写真を、図 11 に試験結果を示す。図 11(a)は直径  $400 \mu m$  のニクロム線でパルス幅を

$160 \mu s$  にした時の結果である。検出器は温度変化に反応した挙動をみせており、その最大到達温度は検出器の結果では  $370C^\circ$ 、式(6)の計算値は  $T = 380 + 20 = 400C^\circ$  となった。図 11(b)は直径  $200 \mu m$  のニクロム線でパルス幅を  $25 \mu s$  にした時の結果である。最大到達温度は検出器からは  $460C^\circ$ 、式(6)の計算値は  $T = 840 + 20 = 860C^\circ$  となり差が大きい。過渡現象での温度の検証と精度の確保が今後の課題である。実験結果より時間分解能としては、 $10 \mu s$  程度は確保できることは期待できる。

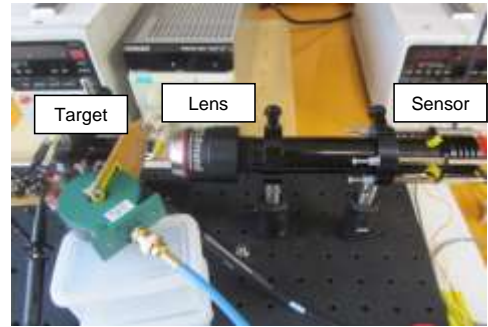
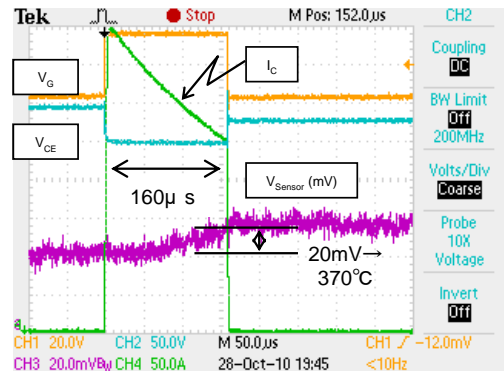
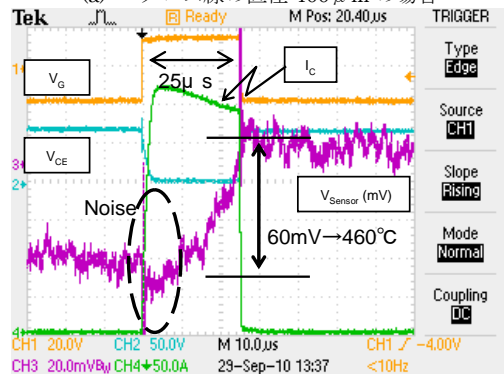


図 10 温度測定装置写真

Figure 10 Photograph of infrared thermometer using InAs sensor



(a) ニクロム線の直径  $400 \mu m$  の場合



(b) ニクロム線の直径  $200 \mu m$  の場合

図 11 過渡温度実験における検出器出力波形

Figure 11 (a) Waveform of sensor output for transient temperature experiment using nichrome wire of  $400 \mu m$  diameter (a), and  $200 \mu m$  diameter (b)

#### 4. 今後の課題

システム実現への課題は、過渡現象の温度の検出精度確保および $1\mu\text{s}$ の時間分解能の実現である。その他に課題点を示す。

- ・スイッチングノイズの除去
- ・破壊からの装置保護
- ・高倍率化

#### 5. 結論

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。素子選定、装置の構築、(1) 設計確認、(2) 空間分解能の確認、(3) 過渡温度測定実験を行った。また残された課題について述べた。

システム実現への課題は過渡現象の温度の検出精度確保および $1\mu\text{s}$ の時間分解能実現である。今後目標値の実現に向け、課題を解決してゆく。

### 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, p.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, p.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 p.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 numerical simulation of new cellular power MOS affected by electro-thermal instability", Microelectronics Journal, Vol.31, p.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(2006)
- (8) William L. Wolfe: "Introduction to Infrared System Design", p17, SPIE (1996)