

## 研究ノート

## 256×256画素小型非冷却赤外線カメラ

## Compact Uncooled Infrared Camera having 256×256 Bolometer Elements

田中雄高\*, 高杉道雄\*, 土川 稔\*, 味沢 昭\*  
和田英男\*\*

## 要 旨

非冷却赤外線カメラは、最近の半導体製造技術の急速な発展により、高性能かつ小型・軽量化が進められている。この研究では、ボロメータ方式による256×256画素の非冷却センサを内蔵した小型非冷却赤外線カメラを試作した。ボロメータ材料には、酸化バナジウムを使用しており、1画素の面積が $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ のブリッジ構造ダイヤフラムに感熱部が形成されている。その結果、フレームレートが30フレーム/秒で、F0.8のレンズを用いた場合、0.1K以下のNETDを得た。

## Abstract

Development of uncooled infrared camera has been accelerated to improve its operating performance and to promote downsizing by production technology of integrated circuit. This report shows uncooled infrared camera which employs 256 x 256 uncooled bolometer sensor elements. Vanadium Oxide material is selected for the uncooled bolometer sensor whose element size is  $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$  and formed on the diaphragm bridge structure.

As a result, it has a NETD of 0.1K with an f/0.8 lens at 30 Hz.

## Key Words

Infrared Detector, Uncooled, Bolometer, Imaging,

## 1. はじめに

人物や物体の発する温度を検出する赤外線センサは、全くの暗闇でも撮像が可能のため、宇宙観

測から民生用までの幅広い分野での用途がある。

特に、最近では冷却装置の不要な、非冷却赤外線センサに注目が集まっている。

\* 日本電気株式会社

〒108-8001 東京都港区芝5-7-1

Yutaka Tanaka, Michio Takasugi, Minoru Hijikawa, Akira Ajisawa  
NEC Corporation, 7-1, Shiba 1-chome, Minato-ku, Tokyo 108-8001, Japan

\*\* 防衛庁技術研究本部

〒154-8511 東京都世田谷区池尻1-2-24

Hideo Wada

Japan Defense Agency, Technical Research and Development Institute  
2-24, Ikejiri 1-chome, Setagaya-ku, Tokyo 154-8511, Japan

(平成11年6月1日受理)

2次元アレイ形状を採用する非冷却赤外線センサにおける多素子化，高感度化は，最近の半導体製造技術の発展とともに目覚ましいものがある。歴史的には1980年代半ばから今日に至るまで米国を中心に，軍用，民生用を問わず研究開発が進められている。米国では，NVEOD (Night Vision & Electro-optics Directorate) を起点において，1985年に SRTS (Short-Range Thermal Sight) Program が開始され，1987年 HIDAD (High Density Array Development) Program が提唱され，8万画素，NETD では0.3K 以下を目指すことになった。さらに，1989年には HIDAD Program の見直しで NETD のゴールを0.1K 以下に設定して，1990年 LOCUSP (Low Cost Uncooled Sensor Prototype) Program が開始され，“dual use” と称して，現在においては軍用，民生用共用の研究開発がなされている<sup>1)</sup>。非冷却赤外線センサとして，最近，特に注目を浴びているものとしては，TI 社の焦電体材料である BST ((BaSr) TiO<sub>3</sub>) を用いたもの<sup>2)</sup> や，Honeywell 社の二酸化バナジウム (VO<sub>2</sub>) を用いたポロメータ型のもの<sup>3)</sup> があるが，いずれも 8 万画素，NETD が0.1K 以下という報告がなされている。

一方，国内においては，平成2年度から非冷却赤外線センサの研究が実施され，熱電対型により128×128画素2次元アレイセンサを実現した<sup>4)</sup>。

センサ1画素の大きさは100μm × 100μm でP型シリコンとn型シリコンの組合せによる32対の熱電対を採用し，F/1のレンズを用いて，フレームレート30Hzで0.5KのNETDを達成している。その後，マイクロマシーニング技術

の発達により非冷却センサの改善が行われ，ブリッジ型ダイヤフラム構造の工夫がなされ，非冷却センサの研究開発が加速された。また，これによりポロメータ型非冷却赤外線センサ<sup>5), 6)</sup> の実用化にも拍車がかかった。

本研究は，酸化バナジウム (VO<sub>x</sub>) をポロメータ型非冷却赤外線センサ材料として用いることにより，より高感度で使用温度範囲の広いセンサを目指して実施したものである。本報告においては，このセンサの概要，及びこのセンサを用いた非冷却赤外線カメラの概要及び基本性能について報告する。

## 2. 非冷却赤外線センサの動作原理

非冷却赤外線センサには，強誘電体型，ポロメータ型，熱電対型があるが，基本的にはどの方式においても，温度分布を持つ被写体からの赤外線放射分布を，カメラレンズを通して赤外線センサの各画素の受光面上に結像させ，受光量に応じた受光面の温度上昇をそれぞれの感熱材料によって電気信号に変換している。図1に各種非冷却赤外線センサの動作原理，非冷却赤外線センサ構造図を示す。

方式	動作原理	性能指標	感度Rv(V/W)	画素構造
ポロメータ	抵抗変化	T C R (α)	$\alpha \cdot \Delta V_b \cdot \psi / G$	
			$\alpha = (dR/dT) / R (K^{-1})$	
熱電対	ゼーベック効果	ゼーベック係数 (Sc)	$\alpha \cdot Sc \cdot \psi / G$	
		Sc(V/K)		
強誘電体	焦電効果	実効焦電係数 (γ)	$\alpha \cdot \gamma \cdot d \cdot \psi / (\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot G)$	
			$\gamma = dD/dT = \int_0^T (ds/dT) \cdot dP/dT (Coul./cm^2 \cdot K)$	

$\psi = 1 - \exp(-t_1/\tau T) \quad \tau T = H/G$       H: 熱容量   G: 熱コンダクタンス   t<sub>1</sub>: 積分時間

図1：各種非冷却赤外線センサの動作原理

まず、ボロメータ型について説明する。ボロメータ型は、ボロメータという抵抗体の温度変化に対応した抵抗変化  $\Delta R$  を、電圧もしくは電流変化の検出により画像化する。ここで重要となるパラメータはボロメータ材料の抵抗温度係数 (TCR: Temperature Coefficient of Resistance) であるが、キャリア濃度あるいは、移動度が温度に依存して変化することによって起こるものであり、この TCR が大きいほど、高感度になる。従って、感度  $Rv$  (Responsivity) は、TCR 及びボロメータにかかるバイアス電圧  $Vb$  に比例し、ボロメータの形成されたダイアフラムの熱コンダクタンスに反比例する。

熱電対型はゼーベック効果を利用し、温接点と冷接点間の温度差を測定している。これは熱電対の電子運動による電圧差  $\Delta V$  (起電力) に基づくものである。通常、熱電対を複数個直列に連ねて信号量を増やしたサーモパイルとして用いられる。強誘電体型は焦電効果を動作原理とし、受光部の温度変化に対応して誘電率もしくは自発分極率が変化することにより発生する強誘電体の分極変化量を検出している。ここで重要なパラメータは誘電率と自発分極率の温度変化率で定義される実効焦電係数である。感度  $Rv$  は実効焦電係数に比例し、熱コンダクタンスと誘電率の積に反比例する。この中でも、焦電型は相対的に自発分極率の温度依存性が高く、誘電ボロメータ型は誘電率の温度依存性の方が高い。

### 3. 256×256画素小型非冷却赤外線カメラ

#### 3.1 ボロメータ型非冷却赤外線センサの動作原理

図2及び3は、本研究において試作したボロメータ方式非冷却赤外線センサのユニットセルの概念

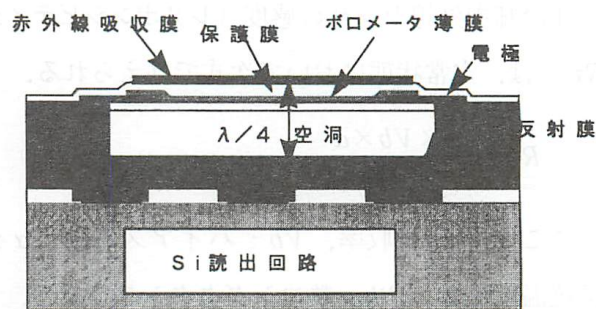


図2：ユニットセルの概念図

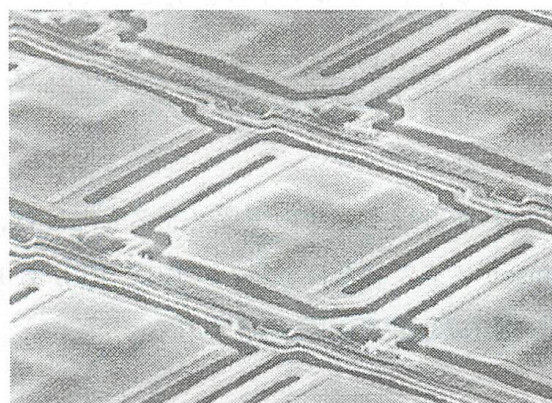


図3：ユニットセルのSEM写真<sup>8)</sup>

図及びSEM写真である。

各画素は、Si基板に形成された信号読出し用回路と、その上にマイクロマシーニング技術を用いて形成された、2本の梁により支持されたダイアフラムから構成される。

ダイアフラムに入射した赤外線は、赤外線吸収膜で一部反射され、一部分は透過する。ダイアフラムを透過した赤外線は下層の金属反射膜で折り返し、入射赤外線の反射成分と打ち消し合う干渉を起こし、熱として吸収されダイアフラムの温度を上昇させる。この干渉条件を効率よく実現するために、上層と下層の光学的な間隔を検知波長の1/4に設定している。

このようなダイアフラムの温度上昇によりボロメータの抵抗が変化し、この抵抗変化は、バイアス電流を流すことにより電気信号に変換される。

非冷却赤外線センサの感度（レスポンスビティ： $Rv$ ）は、定常状態において次式で与えられる。

$$Rv = \frac{\eta \times Vb \times \alpha}{Gth} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\eta$ ：吸収率、 $Vb$ ：バイアス電圧、 $\alpha$ ：抵抗温度係数、 $Gth$ ：熱コンダクタンスである。

また、ノイズ等価温度差（NETD）は、赤外線パワーを $\phi$ 、トータルノイズを $Vn$ として、

$$NETD = \frac{Vn}{Rv \times \phi} \dots\dots\dots (2)$$

と表される。

非冷却赤外線センサの主要ノイズとしては、Johnson ノイズ  $Vj$  及び  $1/f$  ノイズ： $Vf$  があり、それぞれ(3)式及び(4)式で与えられる。

$$Vj = \sqrt{4k T_{op} R \Delta f_m} : \Delta f_m = \frac{1}{2\tau_{ro}} \dots (3)$$

ここで、 $k$ ：ボルツマン定数、 $T_{op}$ ：動作温度、 $R$ ：ボロメータ抵抗値、 $\tau_{ro}$ ：読出し時間である。

$$Vf = Vb \sqrt{K \ln \left( \frac{1}{2\tau_{ro} f_l} \right)} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $K$ ：材料中の自由電子数や移動度で決まる定数、 $f_l$ ：低周波側カットオン周波数である。

これらのノイズに読出し回路のノイズを加えてトータルノイズは決定される。

非冷却赤外線センサにおいては、(1)式から分かるように熱コンダクタンスの向上、即ち感熱部であるダイアフラムの周囲からの熱絶縁の向上が感度向上に寄与するため、非冷却赤外線センサ自身を真空パッケージに収納している。

### 3.2 ボロメータ材料の製作と特性

ここでは、ボロメータ材料として酸化バナジウムを選択した。酸化バナジウムは、室温付近での温度変化に敏感で、TCR を大きくとることがで

き、抵抗値として数  $k\Omega$  ~ 十数  $k\Omega$  に制御可能なため読出し回路との整合性がよく、ボロメータ材料として使用されている。一方、酸化バナジウムは、様々な組成比をもつ結晶相が存在するため、それぞれの結晶相により比抵抗、TCR が著しく異なる。図4に酸化バナジウムの各結晶相における温度特性<sup>7)</sup>を示す。このため、結晶を成長するための成長方法等の選択が難しく、今回の研究で

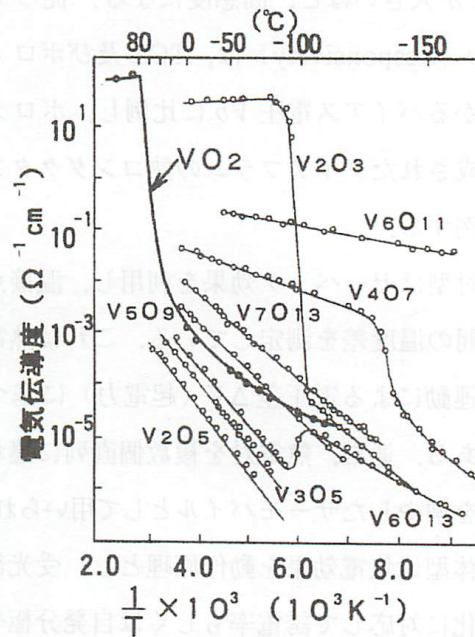


図4：VOxの電気伝導度の温度特性<sup>7)</sup>

は膜厚の均一性や抵抗値の制御において有効な反応性スパッタを採用し、五酸化バナジウムの還元手法により、使用温度範囲の広い安定したVOx薄膜を形成した。

次に、非冷却赤外線センサの製作工程について述べる。表1に製作工程を示す。

Si 製造ラインで製作した読出し回路付き Si ウェハ上に、アルゴンと酸素ガスを用いた反応性スパッタにより  $V_2O_5$  薄膜を基板温度約  $220^\circ C$  で厚さ  $1000 \text{ \AA}$  成膜する。次に、 $320 \sim 330^\circ C$  の水素ガスを混ぜた減圧アルゴンガス中で20時間還元熱処理することにより、様々な相を持つ酸化バナジウムの

表1：製作工程

工 程 名	
1	VO <sub>x</sub> 成膜(反応性スパッタ)
2	還元熱処理
3	VO <sub>x</sub> パターニング(ドライエッチング)
4	保護膜形成(CVD)
5	赤外吸収膜形成(反応性スパッタ)
6	スリット形成(ドライエッチング)
7	犠牲層エッチング

うちでもVO<sub>2</sub>(B)と呼ばれる相にする。

その比抵抗は室温で0.1~0.2Ωcm, 抵抗温度係数は約-2%/Kであり(図5, 6), ボロメータ材料に適していることが分かる。

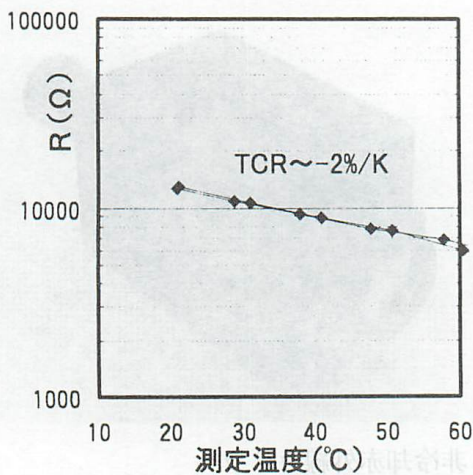


図5：VO<sub>2</sub>(B)の抵抗の温度特性<sup>8)</sup>

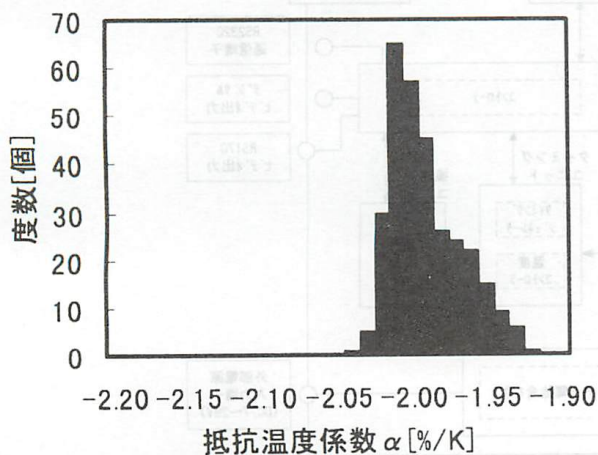


図6：TCRの分布<sup>8)</sup>

このVO<sub>2</sub>(B)ボロメータ薄膜をドライエッチングによりダイアフラム上にのみ残した後、プラズマCVD法で成膜した保護膜で蔽い、後工程の犠牲層エッチングに耐えられるようにする。同保護膜上には、窒素ガスを用いた反応性スパッタにより、厚さ約150Å, 真空インピーダンス(377Ω/□)に近いシート抵抗値を持つTiN赤外線吸収膜をダイアフラム上にのみ形成する(リフトオフ)。次にドライエッチングによりスリット形成を行い、ヒドラジンをを用いたウェット工程で犠牲層エッチングを行うことにより熱分離構造を完成させる。図3のSEM写真に示したように、画素のダイアフラムが平坦に浮いていることが分かる。平坦化には保護膜の応力制御が効いている。この熱分離構造の熱時定数を感度の周波数特性の測定データから算出した結果、約5 msecと実画像を得るのに十分早いことが分かった。

ダイアフラムを支える梁の熱コンダクタンス(*G<sub>th</sub>*)は、梁の構成材料の選択とマイクロマシニング技術による梁幅の縮小により、 $2.6 \times 10^{-7}$  W/Kを実現した。(図7)

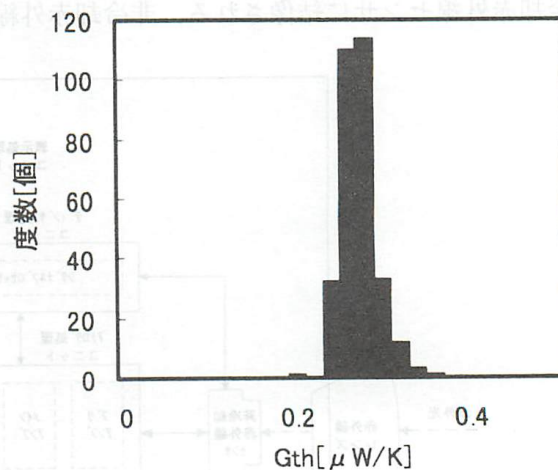


図7：熱コンダクタンスの分布<sup>8)</sup>

また、ユニットセルは50μmピッチで配列され、ダイアフラム部のフィルファクタは51%を達

成した。更に、赤外線吸収膜と反射膜との間隔の制御、及び赤外線吸収膜のシート抵抗の制御により赤外線吸収率80%を実現した。

表2に非冷却赤外線センサの主要性能を示す。

表2：非冷却赤外線センサの主要性能

集積度	256×256
画素ピッチ	50μm×50μm
光電変換方式	ボロメータ
ボロメータ材料	酸化バナジウム(TCR~-2%/K)
画素構造	フリッジ型(Gth~2.6×10 <sup>-7</sup> W/K)
素子構造	モノリシック
赤外線吸収率	80%
フィルファクタ	51%
スキャナ	MOS

### 3.3 非冷却赤外線カメラ

この非冷却赤外線センサを組み込んだカメラの外観写真を図8に示す。図9に示す機能ブロック図により本非冷却赤外線カメラの動作について説明する。目標からの赤外線は赤外線レンズにより非冷却赤外線センサに結像される。非冷却赤外線

センサからの信号はアナログ処理ユニットにて増幅された後、A/D変換される。この信号はデジタル処理ユニットにて処理された後、ビデオ信号に変換される。

このカメラの寸法・質量は、97mm×90mm×140mm、1.0kgと小型ながら、ビューファインダーを内蔵すると共に、内蔵の電池により最大2時間の連続作動が可能である。電源は、内蔵電池の他に外部からのDC入力に対応している。

信号の入出力では、一般的なRS-170ビデオ出力の他に、デジタルビデオ出力とRS232Cによる通信端子を備えている。通信端子の利用により、外部からコントラスト、ブライトネス等の調整が

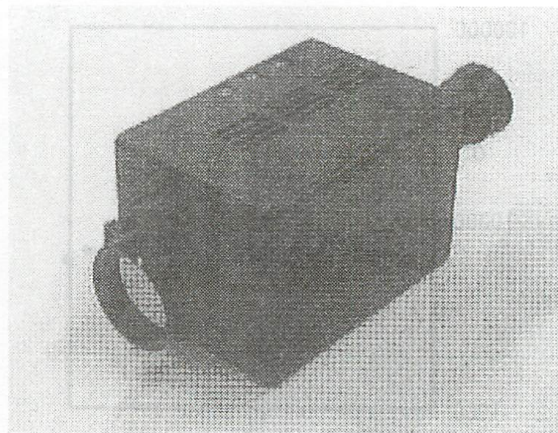


図8：非冷却赤外線カメラ

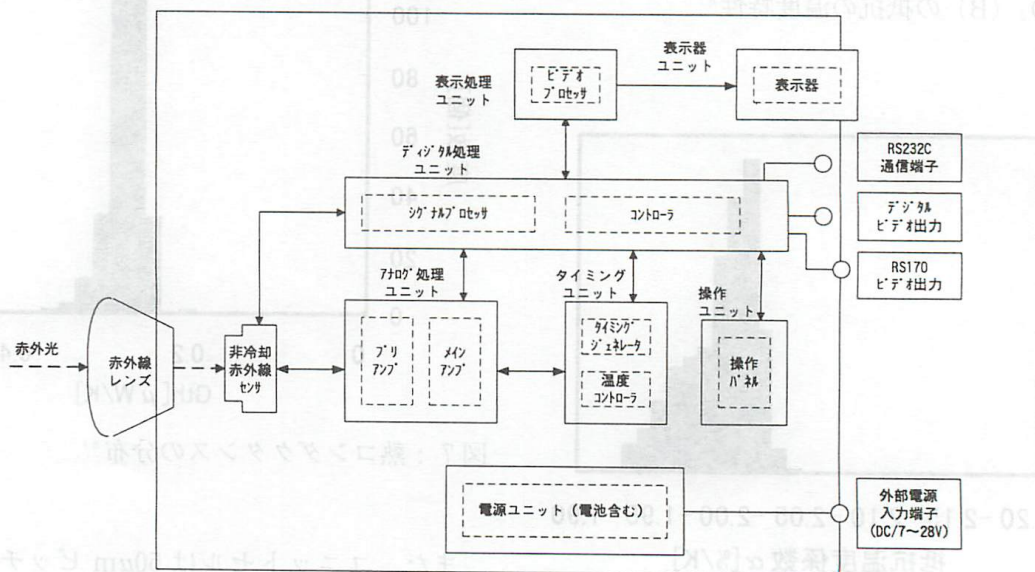


図9：機能ブロック図

可能である。赤外線レンズは焦点距離20mmで視野角35°を確保した。また、常温近傍の目標の識別を目的とするため、10 $\mu$ m帯の透過特性を向上させている。

表3に、この小型非冷却赤外線カメラの主要性能を示す。また、図10に本撮像装置による撮像例を示す。

表3：非冷却赤外線カメラの主要性能

使用波長	8~12 $\mu$ m
NETD	0.1 $^{\circ}$ C以下(F/0.8標準レンズ使用時)
視野	35'×35' (標準レンズ使用時)
出力信号	RS170準拠
フレームレート	30Hz
消費電力	7W
連続使用時間	2時間(内蔵バッテリー使用時)
寸法(W×H×D)	97mm×90mm×140mm
重量	1kg
その他機能	・RS-232Cによるリモートコントロール ・デジタルビデオ出力



図10：非冷却赤外線カメラによる撮像例

#### 4. まとめ

本研究では、ボロメータ方式による256×256画素非冷却赤外線センサを使用し、ビューファインダー及び電池を内蔵した小型非冷却赤外線カメラを試作した。この非冷却赤外線カメラにおいて、

F/0.8レンズを用い、フレームレート30Hzで、NETD 0.1 $^{\circ}$ Cという性能を得た。

#### 参考文献

- 1) R. E. Flannery et al : "Status of uncooled infrared imagers", Proc. SPIE, vol.1689, pp.379-395, 1992
- 2) M. H. Unewisse et al. : "Performance of uncooled semiconductor film bolometer infrared detectors", Proc. SPIE, vol.2269, pp.43-52, 1994
- 3) R. A. Wood : "Uncooled thermal imaging with monolithic silicon focal planes", Proc. SPIE, vol.2020, pp.322-39, 1993
- 4) T. Kanno et al : "Uncooled infrared focal plane array having 128×128 thermopile detector elements", Proc. SPIE, vol.2289, pp.450-459, 1994
- 5) A. Tanaka et al : "Infrared Focal Plane Array Incorporating Silicon IC Process Compatible Bolometer", IEEE Trans. Electron Devices ED-43, pp.1844-1850, 1996
- 6) M. H. Unewisse et al : "Performance of uncooled semiconductor film bolometer infrared detectors", Proc. SPIE, vol.2269, pp.43-52, 1994
- 7) R. Royet al : "Second quarterly report on crystalstudies", the Pennsylvania State Univ. the Material ResearchLab., 1996
- 8) 和田, 嶋, 鳥, 土川, 小田 : 電気学会論文誌 E, Vol.117-E, No.12, pp.612-616, 1997