

高輝度発光ダイオードの温度センシング特性

Temperature-sensing properties of high-brightness light-emitting diodes

小山 英樹* 西村 尚大**
KOYAMA Hideki NISHIMURA Naohiro

高輝度発光ダイオード(LED)の温度センサへの応用の可能性を探るため、発光色の異なる4種類の高輝度LEDの順方向電圧の温度依存性を測定した。実験の結果、10℃~70℃で電圧が温度に対して直線的に変化することが確認でき、温度センサとして使用可能であることがわかった。また、一般のSiダイオードよりも小電流で動作可能であるため、センサ自体の発熱の影響を抑えることもできる。温度に対する電圧の変化もSiダイオードより大きくすることができ、青色LEDで最大3.73 mV/℃の値が得られた。発光という生徒の興味を引く性質を有する高感度の温度センサとして、半導体や計測・制御などの分野の学習に利用可能である。

キーワード：ダイオード, LED, 半導体, pn接合, 温度センサ

Key words : diode, LED, semiconductor, pn junction, temperature sensor

1. はじめに

高効率・長寿命などの特長を有することから照明やディスプレイ、信号機など身近なものへの応用が近年急速に広がっている発光ダイオード(LED)は、使いやすい小型のランプとして教材にも多用されている。単にランプとして使用するもののほか、小電流、高速応答、光起電力などの特徴を生かし、携帯電話の光るアンテナ¹⁾、光通信^{2,3)}、光-電気エネルギー変換⁴⁾など、従来のランプ(豆電球など)では実施が困難(あるいは不可能)な実験にも多く使われている。LEDは電気的な特性においても従来のランプとは大きく異なっており、電流が一方方向(順方向)にしか流れない、また順方向に電流を流す場合でもある程度の電圧(立ち上がり電圧)を加えなければならない、などの特徴がある。この電気的な特性を学校教育に応用した例としては、立ち上がり電圧と発光波長との関係からプランク定数を求める実験^{5,6)}などがあるが、光源として利用したものにと比べると報告例はあまり多くない。

このような電気的な特性は、LEDが基本的にはp形半導体とn形半導体の接合(pn接合)からなるダイオードであることによるものである。その意味で、LEDは発光という生徒の興味を引く現象を示すダイオードである、と言うこともできる。すなわち、あらゆる半導体素子の基本構造であるpn接合の特性をLEDを用いて学習するようにすれば、生徒の関心を高め効果的に授業を進めることができるものと考えられる。

半導体pn接合の特徴の一つに、一定電流の条件下、電圧が温度に対して直線的に変化するという性質がある。これを利用して、一般の整流用ダイオードを用いて、大

学の物理学実験で使用する温度測定装置を開発した例が報告されている⁷⁾。この例では単に温度測定装置として利用しただけであるが、温度依存性が直線的であることから比較的簡単な回路や制御プログラムで装置を製作することができるため、このような装置をpn接合の性質、あるいは計測制御技術を学ぶための教材・教具として利用することも可能である。AcharyaとVyayahare⁸⁾は、一般の整流用ダイオードと同様にLEDも直線的な温度依存性を示すことを実験的に確認し、温度センサとして有効であることを実証した。しかし、彼らが実験に使用したLEDは構造の比較的単純なGaP LEDで、最近の主流である高輝度のもの(ダブルヘテロ構造など高効率化技術が施されている)とは素子構造が大きく異なる。生徒の関心を高める目的でLEDを使用するのであれば、青色や緑色のものを含む高輝度LEDが温度センサとして使用できるのかどうか、明らかにする必要がある。

そこでここでは、高輝度LEDを温度センサとして用いた教育用の温度計測システムを開発することを目的とし、種々の高輝度LEDの温度センサとしての性能を実験的に評価したのでその結果を報告する。

2. ダイオードの順方向電圧の温度依存性

絶対温度 T において理想的なpn接合ダイオードに電圧 V を加えたとき、流れる電流 I は以下の式で表される。

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

ここで I_0 は V が負のときの飽和電流値(逆方向飽和電流)、 q は素電荷、 k はボルツマン定数である。 I が I_0

*兵庫教育大学大学院教育内容・方法開発専攻行動開発系教育コース 教授 **神奈川県立磯子工業高等学校 平成27年10月21日受理

に比べ十分大きい領域では上式は

$$I \cong I_0 \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2)$$

と近似することができる.

逆方向飽和電流 I_0 は温度 T に依存し, その依存性は半導体のバンドギャップ (禁制帯幅) エネルギー E_g を用いて

$$I_0 = A_s \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \quad (3)$$

と表される. ここで係数 A_s も温度に依存するが, その関係は $T^{(3+\gamma)}$ (γ は定数) に比例する⁹⁾ ものであり, 指数部分に比べ変化が小さいので無視できる. 式 (2) と (3) より V と T の関係を求めると

$$V = -\frac{k}{q} \ln\left(\frac{A_s}{I}\right) \cdot T + \frac{E_g}{q} \quad (4)$$

となり, 電流 I が一定であれば V は T に対し直線的に変化する.

3. 実験方法

図 1 に示すようにダイオードを恒温槽 (日本プロアー製バイオチャンバー LS-5N) に入れ, プログラマブル直流電源 (アドバンテスタ R6144) により一定電流を供給したまま 10°C から 70°C まで 5°C 刻みで温度を上昇し, マルチメータ (Keithley 2000 型) で順方向電圧の変化を測定した. 電圧の測定は恒温槽内の温度が十分安定 (すなわち電圧が十分安定) したのを確認してから行った.

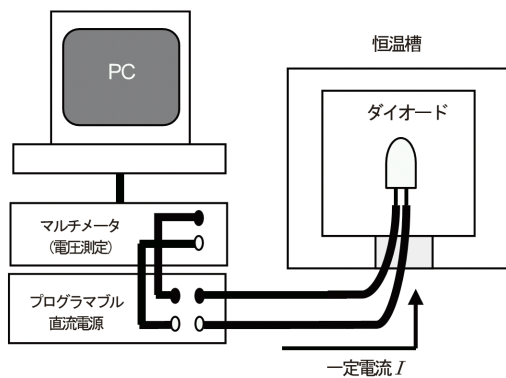


図 1. 順方向電圧の温度依存性の測定

実験に使用したダイオードは表 1 に示す 5 種類である. 4 種類の高輝度 LED に加え, 比較用として整流用 Si ダイオード (1S2076A) も使用した. 自作の簡易な装置^{12,13)} で測定した各ダイオードの電流-電圧特性を図 2 に示す.

表 1. 使用したダイオード

記号	型番	発光色	光度 (mcd)
R	HLMP-C115	赤	600 ⁽¹⁰⁾
Y	HLMP-C315	黄	300 ⁽¹⁰⁾
G	HLMP-C515	緑	300 ⁽¹⁰⁾
B	E1L51-3B0A2	青	1800 ⁽¹¹⁾
Si	1S2076A	—	—

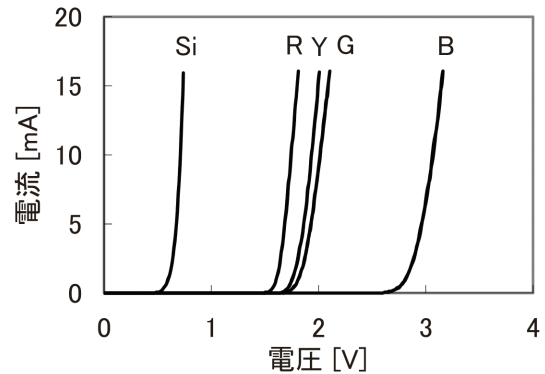


図 2. 各ダイオードの電流-電圧特性

4. 実験結果と考察

(1) $I=10\text{mA}$ のときの順方向電圧の温度依存性

順方向電流 $I=10\text{mA}$ 一定の条件で測定した各ダイオードの順方向電圧 V の温度依存性の測定結果を図 3 に示す. 使用した 5 種類のダイオードのすべてにおいて良好な直線関係が見られることがわかった. これらの直線の傾きを表 2 に示す. 傾きの大きさが最も大きいのは B (青色 LED) で $2.45\text{mV}/^\circ\text{C}$ という値が得られている. B はその発光色あるいは図 2 の立ち上がり電圧から明らかなように, 使用した 5 種類のダイオードの中で最もバンドギャップエネルギー (E_g) の大きい半導体材料を用いている. しかし, それ以外の 4 種類のダイオードで得ら

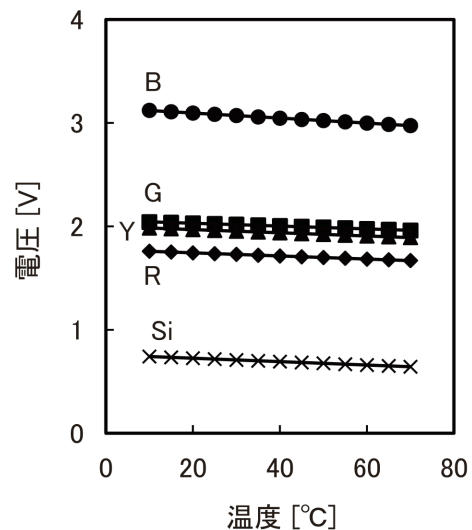


図 3. 順方向電圧の温度依存性 ($I=10\text{mA}$)

れた温度依存性の傾きの大きさは Si, Y, R, G の順になっており、それぞれの半導体材料の E_g の大きさの順 (G, Y, R, Si) とは一致していない。文献⁸⁾には、 E_g の大きい半導体を用いたダイオードの方が大きな温度依存性を示すという記述もあるが、ここで得られた結果は必ずしもそのようにはなっていない。

表 2. 温度依存性の傾き ($I=10\text{mA}$)

ダイオード	B	G	Y	R	Si
傾き ($\text{mV}/^\circ\text{C}$)	-2.45	-1.36	-1.53	-1.49	-1.65

5種類のダイオードで得られた傾きの値について明確な規則性が見られない原因の一つとして、同一規格の個々のダイオードの間の個体差が影響していることが考えられる。そこで、赤色 LED (R) について、同じ規格の3個の LED (R_1, R_2, R_3) を使用して温度依存性を比較した。その結果を図 4 および表 3 に示す。実験結果を見ると、温度依存性の傾きの間には最大 $0.23 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ の差があることがわかる。すべてのダイオードにこの程度の個体差があると仮定すれば、表 2 の結果をもとに温度依存性の傾きと E_g との間の相関関係を否定することはできなくなり、多くの個体を用いたより詳細な検討が必要になる。いずれにしても個体差がやや大きいことから、温度センサとして使用する場合、同一の型番であってもダイオードごとに校正をする必要があることが明らかになった。

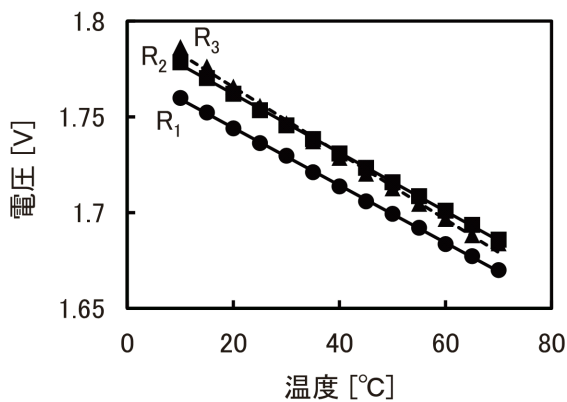


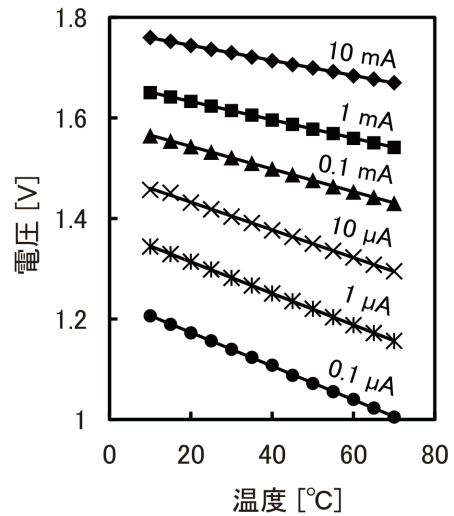
図 4. 温度依存性の個体差 ($I=10\text{mA}$)

表 3. 温度依存性の傾きの個体差

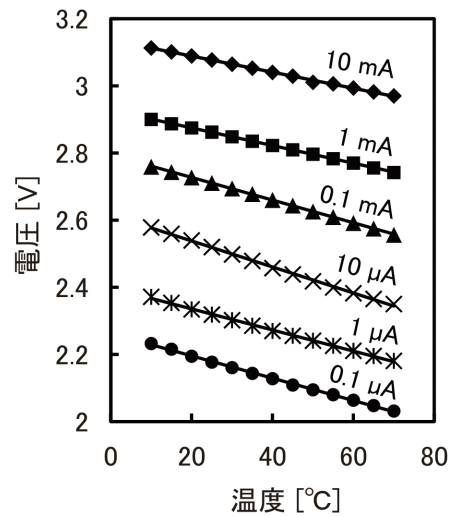
ダイオード	R_1	R_2	R_3
傾き ($\text{mV}/^\circ\text{C}$)	-1.49	-1.53	-1.72

(2) 温度依存性の電流による変化

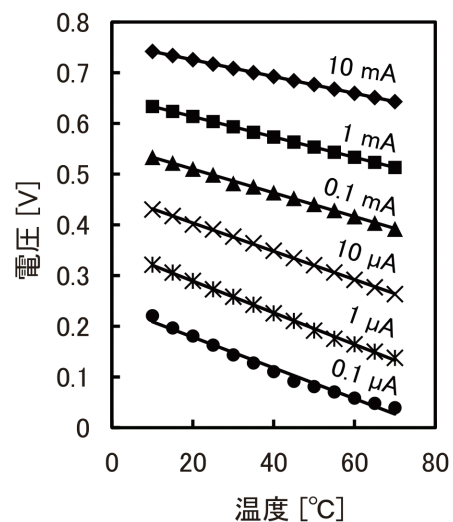
式 (4) によれば、順方向電流 I が小さければ小さいほど、電圧 V の温度依存性の傾きの大きさが大きくなり、高感度の温度センサとして利用することが可能になる。そこで赤色 LED (R)、青色 LED (B)、Si ダイオード (Si) の3種類のダイオードについて、電流 I を変えて V の温度依存性を測定した。その結果を図 5 (a) ~ (c) に示す。



(a) 赤色 LED (R)



(b) 青色 LED (B)



(c) Si ダイオード (Si)

図 5. 温度依存性の電流による変化

図5より、LED (R および B) の場合は $0.1\mu\text{A}$ まで電流を小さくしても良好な直線関係を示すが、Si ダイオードの場合は下にやや凸の曲線を描いていることがわかる。Si ダイオードはLED に比べ E_g が小さく、少数キャリア濃度が高いため逆方向飽和電流 I_0 は大きい。実験に使用した Si ダイオード (1S2076A) の場合、データシート¹⁴⁾ には I_0 は $0.1\mu\text{A}$ 以下と記載されている。したがって $I = 0.1\mu\text{A}$ の条件では (2) 式の近似が成り立たず、そのため V の温度依存性が非直線的になるものと考えられる。温度センサとして使用する場合、電流が小さい方がセンサ自体の発熱の影響が小さく、正確な温度測定が可能になる。LED の方が小さい電流で使用できるため、Si ダイオードよりもこの点で優れていることがわかる。

図5の各直線から得られた傾きを電流 I に対してプロットすると図6のようになる。今回の実験では電流値は $0.1\mu\text{A}$ (10^{-7}A) から 10mA (10^{-2}A) まで変化させたが、Acharya と Vyayahare⁸⁾ は 1 pA (10^{-12}A) という極小電流まで測定を行っており、図6ではその結果も示してある。これを見ると、赤色高輝度 LED (R) と Si ダイオードについては、Acharya と Vyayahare が GaP LED を用いて行った結果とほぼ一致する傾向が得られていることがわかる。

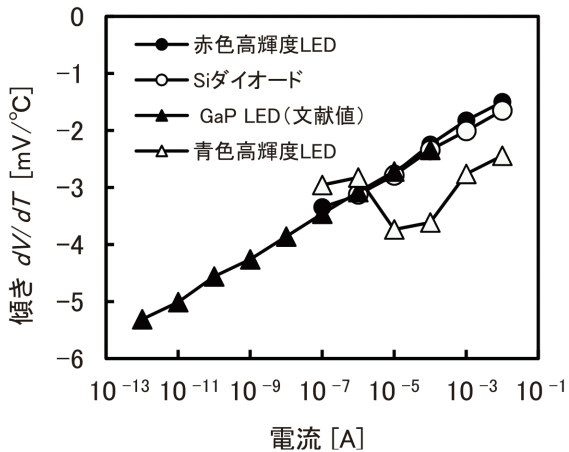


図6. 温度依存性の傾きの電流による変化

式 (4) より、電圧 V の温度依存性の傾き dV/dT は

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dT} &= -\frac{k}{q} \ln\left(\frac{A_s}{I}\right) \\ &= \frac{k}{q \cdot \log_{10} e} \log_{10} I - \frac{k}{q} \ln A_s \end{aligned} \quad (5)$$

と表され、 $\log_{10} I$ に対して直線となり、その傾きは $k/(q \log_{10} e) = 0.198\text{mV}/^\circ\text{C}$ となる。一方、図6の実験結果が示す直線の傾きは約 $0.37\text{mV}/^\circ\text{C}$ で、理論値の2倍弱と大きい。これは、ダイオードの電流 I と電圧 V の関係が式 (1) で表されるような理想的なものではないことを示している。 I と V の関係は一般には理想因子 n を用いて

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

と表される。理想的なダイオードでは n は1であるが、通常は1より大きい値をとり、As系やP系の化合物半導体を用いたLEDでは2程度の高い値をとることもあると報告されている¹⁵⁾。式 (6) を用いた場合、 dV/dT の $\log_{10} I$ に対する傾きは $nk/(q \log_{10} e)$ で与えられ、 $n \approx 1.9$ と考えれば図6の結果を説明できる。

図6において、青色LED (B) のみ、他のダイオードとは大きく異なる振る舞いを示している。GaN系の半導体材料が用いられている青色LEDは、理想因子が $n = 7.0$ のような著しく高い値をとることもあり¹⁵⁾、その電気的特性が単純なpn接合のそれとは大きく異なっているものと考えられる。温度依存性の傾きの大きさは今回用いたダイオードの中で最も大きな値 ($I = 10\mu\text{A}$ で $3.73\text{ mV}/^\circ\text{C}$) を示しており、また図5 (b) から明らかなように $10^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ の範囲では良好な直線性を示しているが、他の電流値、特に極小電流での振る舞いが不明であり、使用の際には注意が必要である。

5. まとめ

高輝度LEDの順方向電圧 V の温度依存性を測定し、温度センサとしての性能を評価した。電流 $I = 10\text{mA}$ の場合、実験に使用したすべての高輝度LEDにおいて、 $10^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ の範囲で、 V の温度依存性が良好な直線性を示すことがわかった。赤色高輝度LEDでは一般のSiダイオードや輝度の高くないGaP LEDと同様、電流 I を下げると温度依存性の傾き (dV/dT) の大きさが単調に増加する傾向が見られた。このとき、Siダイオードでは $I = 0.1\mu\text{A}$ 以下で温度依存性の直線性が失われるにもかかわらず、LEDでは高い直線性が維持されることがわかり、センサ自体の発熱の影響が少ない小電流での使用が可能であることが実験的に確認できた。青色高輝度LEDは電流によっては大きな傾きを有する温度依存性を示すが、電流に対する変化が不規則であるため使用には注意が必要である。

参考文献

- 菅原陽：「光るアンテナ」作成と共鳴実験，物理教育，第50巻，第5号，pp.307-308 (2002)
- 長谷川誠：発光ダイオードを用いた光通信実験セットとそれを利用した演示実験の実践，応用物理教育，第32巻，第2号，pp.27-32 (2008)
- 小山英樹，高田裕治：簡易な双方向光通信実験装置，第72回応用物理学会学術講演会講演予稿集，p.18-047 (2011)
- 渡辺理文，鎌田正裕：光と電気の間でのエネルギー

- 変換を実感させるための教材, 物理教育, 第59巻, 第1号, pp.9-13 (2011)
- 5) 根本和昭: LED を用いたプランク定数の測定実験, 物理教育, 第49巻, 第6号, pp.545-547 (2001)
 - 6) 小野寺力, 室谷利夫: 発光ダイオードを用いたプランク定数の実験, 応用物理教育, 第31巻, 第2号, pp.3-6 (2007)
 - 7) 西岡正泰, 伊藤康明: ダイオード温度計を用いた液体の比熱の測定, 物理教育, 第26巻, 第2号, pp.133-136 (1978)
 - 8) Y. B. Acharya and P. D. Vyavahare : Study on the temperature sensing capability of a light-emitting diode, Rev. Sci. Instrum. vol.68, no.12, pp.4465-4467 (1997)
 - 9) S. M. Sze and K. K. Ng: Physics of Semiconductor Devices, 3rd ed., John Wiley & Sons (2007)
 - 10) Data sheet, Avago Technologies.
 - 11) Data sheet, Toyota Gosei.
 - 12) 池田政也, 小山英樹, 森山潤: コンピュータを用いた簡易な電流-電圧特性測定装置の開発, 日本産業技術教育学会近畿支部第25回研究発表会講演論文集 p.17 (2008)
 - 13) 池田政也, 小山英樹, 森山潤: 8ビット電流-電圧特性測定装置の開発, 第70回応用物理学会学術講演会講演予稿集 p.418 (2009)
 - 14) 1S2076A データシート, ルネサステクノロジ
 - 15) E・フレッド・シューベルト著, 八百隆文ほか訳: 発光ダイオード, 朝倉書店 (2010)