

硅禁带宽度的温度关系

易 明 筑

(北京半导体器件研究所)

1986年6月8日收到

本文提出了硅禁带宽度的温度关系的一个新的表达式。它可用于一个宽的温度范围(150—400K)，同时又具有较高的精度，并且特别适合应用于带隙参考电压源与集成温度传感器等电路的设计。

一、引言

硅禁带电压 V_G 的温度关系对高精度带隙参考电压源与温度传感器等电路的设计是重要的。Tsividis 曾明确指出并分析了 V_G 温度关系的非线性对结电压 V_{BE} 和带隙参考电压温度行为的影响^[1]。然而，由于没有一个合适的宽温度范围的 $V_G(T)$ 表达式，因而在最近的一些设计中仍未能考虑这一因素^[2-4]。为此本文提出一个新的 $V_G(T)$ 表达式。它可用于 150—400K 的温度范围。

二、已有的 $V_G(T)$ 经验公式

文献[5]曾给出 0—400K 范围内 $V_G(T)$ 的一个经验公式

$$V_G(T) = V_G(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}. \quad (1a)$$

其中 $\alpha = 7.021 \times 10^{-4} \text{V/K}$, $\beta = 1108 \text{K}$, $V_G(0) = 1.1557 \text{V}$ 。由于没有考虑激子能量的影响，这一组参数不够精确。后来文献[6]给出

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 4.73 \times 10^{-4} \text{V/K} \\ \beta = 6.36 \text{K} \\ V_G(0) = 1.170 \text{V} \end{array} \right\} \quad (1b)$$

但这组参数的不确定性较大，并且在低温区给出的 V_G 值误差可达几个毫伏。

另一方面，文献[7]曾在低温区(150—300K)精确测量过 $V_G(T)$ ，并在 0.2mV 的误差范围内给出如下经验关系

$$V_G(T) = a - bT - cT^2, \quad (150 \text{K} \leq T \leq 300 \text{K}) \quad (2a)$$

其中

$$\left. \begin{array}{l} a = 1.1785 \text{V} \\ b = 9.025 \times 10^{-3} \text{V/K} \\ c = 3.05 \times 10^{-7} \text{V/K}^2 \end{array} \right\} \quad (2b)$$

由于式(2)没有给出高温区($300-400K$)的数据,因而在[1]的工作中不得不采用线性外推方法从式(2)外推来弥补高温区的 V_G 值:

$$V_G(T) = V_G(0) - bT, \quad (300K \leq T \leq 400K) \quad (3a)$$

其中

$$\left. \begin{array}{l} V_G(0) = 1.20595 \\ b = 2.7325 \times 10^{-4}V/K \end{array} \right\} \quad (3b)$$

三、新的 $V_G(T)$ 表达式

由于式(1)在低温区不够精确,而式(2)又不能运用于高温区,同时两者的形式对于参考电压源等电路的设计应用都不十分方便,因此本文提出 $V_G(T)$ 的一个新的表达式如下:

$$V_G(T) = V_G(0) - A \frac{T}{T_r} \left[1 + B \ln \left(\frac{T}{T_r} \right) \right]. \quad (4a)$$

其中 T_r 为任意选定的参考温度, $V_G(0)$ 及 A 与 B 为拟合参数。考虑到式(2)比较精确,我们将式(4a)与式(2)进行拟合。参考温度 T_r 选为 $300K$,由此得到式(4a)中的参数为:

$$\left. \begin{array}{l} V_G(0) = 1.17323V \\ A = 0.049V \\ B = 0.567 \end{array} \right\}, \quad (T_r = 300K) \quad (4b)$$

为便于比较,图1给出了 $150-400K$ 范围内式(4)与式(1)、(2),以及式(2)的线性外推式(3)之间的误差。可以看到,式(4)与式(2)之间的误差在 $0.3mV$ 以内。并且,除低温端外,在大部分温度范围内它与式(1)之间的误差也不超过 $0.3mV$ 。因而式(4)可在 $150-400K$ 的温度范围内应用。

顺便指出,从图1可以看到,文献中通常采用的线性外推式(3)与式(1)之间的误差将近 $1mV$,远高于式(4)的误差。

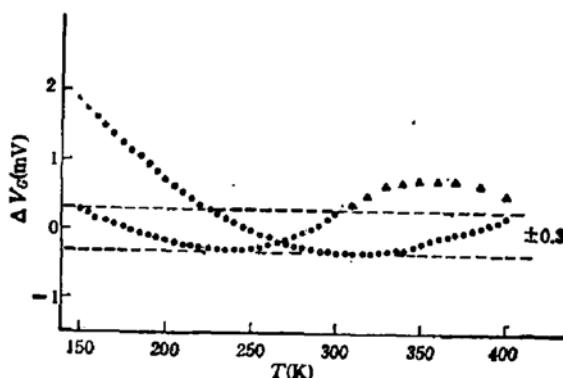


图1 各 $V_G(T)$ 表达式之间的误差
 ○ 式(4)对式(1); ● 式(4)对式(2); ▲ 式(4)对式(3).

四、带隙参考电压

下面将式(4)应用于带隙参考电压。图2为带隙参考电压源的原理电路。输出参考电压 V_R 由 Q_1 的BE结压降 V_{BE} 与 R_1 上产生的温度补偿电压 $\frac{R_1}{R_0}V_{PTAT}$ 叠加构成。这里 V_{PTAT} 为正比于绝对温度 T 的电压。根据 $T = T_0$ 时使 V_R 具有零温度系数的条件可得

$$V_R = V_{BE} - T \left(\frac{\partial V_{BE}}{\partial T} \right)_{T_0} \quad (5)$$

而 V_{BE} 可表示为 $V_{BE} = V_T \ln \left(\frac{I_e}{I_s} \right)$, 其中 $V_T = kT/q$, I_s 为EB结饱和电流, 通常表示为

$$I_s \sim T^m \exp \left(-\frac{V_G(T)}{V_T} \right). \quad (6)$$

当 $V_G(T)$ 采用线性近似时, 有 $I_s \sim T^{m'} \exp \left(-\frac{V_G(0)}{V_T} \right)$ 。如采用本文的 $V_G(T)$ 表达式, 则式(6)成为

$$I_s \sim T^{m'} \exp \left(-V_G(0)/V_T \right). \quad (7)$$

其中 $m' = m + \lambda$, $\lambda \triangleq A \cdot B/V_{T_0}$, $V_{T_0} = kT_0/q$ 。由式(7)可得

$$V_{BE} = V_G(0) + \frac{T}{T_0} (V_{BE}^0 - V_G(0)) - m' V_T \ln \frac{T}{T_0} + V_T \ln \frac{I_e}{I_s^0}. \quad (8)$$

其中 V_{BE}^0 与 I_s^0 分别是 $T = T_0$ 时的 V_{BE} 与 I_s 值。设 $I_s \sim T^n$, 代入式(8), 再代入式(5)可得

$$V_R = V_G(0) + (m' - n)V_T \left(1 - \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right). \quad (9)$$

令 $T = T_0 + \Delta T$, $\Delta T/T_0 = x$, 则式(8)与(9)成为

$$V_{BE} = V_{BE}^0 - x [V_G(0) + (m' - n)V_{T_0} - V_{BE}^0] - O(x^2). \quad (10)$$

$$V_R = V_R^0 - O(x^2). \quad (11)$$

其中 V_R^0 为 V_R 的零温漂值

$$V_R^0 = V_G(0) + (m' - n)V_{T_0}. \quad (12)$$

$O(x^2)$ 为 x 的高阶项

$$O(x^2) = (m' - n)V_{T_0}[(1 + x)\ln(1 + x) - x]. \quad (13)$$

根据文献[8]的数据, $m = 2.2$, $n = 1$, 由式(4b)的数据, $\lambda = 1.07$, 故 $m' = 3.27$, 又, $V_G(0) = 1.17323$, 这与[8]中为解释实测的 V_R^0 值及 V_R 的漂移分量(对应于 $O(x^2)$ 项)所需要的值 $m = 3.125$ 及 $V_G(0) = 1.180V$ 十分接近。另外, 文献[1]中图5(e)工艺条件下(第V号工艺)晶体管的 $m = 2.405$, $V_G(0) = 1.20595V$, 而解释测得的 $V_{BE}(T)$ 曲线要求 $m = 3.429$, $V_G(0) = 1.1761V$ 。若按本文, 则有 $m' = m + \lambda = 3.475$, $V_G(0) = 1.17323V$ 。这与要求值几乎吻合。

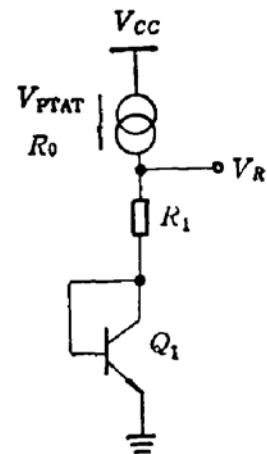


图2 带隙参考电压源电路

结论：本文的 $V_G(T)$ 表达式能在宽温度范围内衔接和拟合已有的经验公式，并解决了长期以来，在线性 $V_G(T)$ 近似下，晶体管中 $V_G(0)$ 及 m 值与实验结果之间的矛盾。

参 考 文 献

- [1] Y. P. Tsividis, *IEEE J. Solid-State Circuits*, SC-15, 1076 (1980).
- [2] G. C. M. Meijer, et al., *IEEE J. Solid-State Circuits*, SC-17, 1139 (1982).
- [3] B. S. Song and P. R. Gray, *IEEE J. Solid-State Circuits*, SC-18, 634 (1983).
- [4] P. Menniti and S. Storti, *IEEE J. Solid-State Circuits*, SC-19, 442 (1984).
- [5] Y. P. Varshid, *Physica*, 34, 149 (1967).
- [6] C. D. Thurmond, *J. Electrochem. Soc., Solid-State Sci. and Technol.*, 122, 1133 (1975).
- [7] W. Bludau, et al., *J. Appl. Phys.*, 45, 1846 (1974).
- [8] K. E. Kuijk, *IEEE J. Solid-State Circuits*, SC-8, 222 (1973).

Expression for the Temperature Dependence of the Bandgap Voltage of Silicon

Yi Mingguang

(Beijing Research Institute of Semiconductor Devices)

Abstract

A new expression for the temperature dependence of the bandgap voltage of silicon is suggested, which should prove of value in the design of bandgap reference sources and bipolar transistor temperature transducers.