

双极器件中硅基区和锗硅基区的禁带变窄量

金海岩 张利春

(北京大学微电子学研究所, 北京 100871)

摘要: 采用一种新的方法计算双极器件中离子注 B 硅基区和原位掺 B 的锗硅基区禁带变窄量。在器件基区的少子迁移率、多子迁移率和方块电阻已知的情况下, 应用这种方法只需测量室温和液氮温度下的电学特性就可以获得禁带变窄量。这种方法从双极晶体管的集电极电流公式出发, 利用 V_{BE} 做自变量, 在室温和液氮温度下测量器件的 Gummel 图, 选取 $\ln I_c$ 随 V_{BE} 变化最为线性的一部分读出 V_{BE} 及相应的 I_c 数值, 获得两条 $V_{BE}-\ln I_c$ 直线, 通过求解两条直线的交点可以计算出基区的禁带变窄量 ΔE_G 。利用这种方法测试了硅双极器件和锗硅基区双极器件, 其基区禁带变窄量分别为 41meV 和 125meV, 这个测量结果与文献中的数值符合较好。

关键词: 双极晶体管; 锗硅基区; 禁带变窄量

EEACC: 2560J; 7110; 2520M

中图分类号: TN 322⁺.8 **文献标识码:** A

文章编号: 0253-4177(2001)04-0456-04

1 引言

硅双极器件因其开关速度快, 驱动能力强, 模拟特性良好等本质优点, 使它在超高速集成电路领域占有重要的地位。在高速硅双极器件中, 减少基区宽度可以提高器件的工作速度, 这就需要提高基区的掺杂浓度以防止基区穿通, 但高掺杂的基区会导致电流增益下降。锗硅基区的发展突破了硅器件的极限, 它使重掺杂的基区仍能保持较高的发射效率, 同时提高了基区穿通电压。随着能带工程的发展, 需要调节基区的禁带宽度值以改变器件的电学性质, 而基区的掺杂浓度, 锗硅合金中锗的含量, 都会对禁带宽度产生较大影响。为获得双极器件中材料的禁带宽度, 目前国外通常采用做 $\ln(J_c/J_0)-1/T$ 图并求解斜率的方法^[1-3], Ashburn 和 Hashim 等人在这方面作了较多的研究。由于需要在全温区范围内测量材料的方块电阻, 因此这种方法对恒温设备和测量仪器的要求都很高, 而且当测量温度范围较大时, $\ln(J_c/J_0)-1/T$ 不再为线性关系, 即测量值不再满足双极晶体管的集电极电流公式, 从而使测量误差增大。为了简化测量过程, 提高测试精度, 我们采用了

一种新的测量禁带宽度的方法。这种方法只需在室温(300K)和液氮温度(77K)下测量器件的电学特性, 不需要恒温设备。我们用 HP4156B 半导体参数分析仪测量了自己研制的多晶硅发射极晶体管和锗硅异质结晶体管在室温和液氮温度下的 Gummel 图, 选取 $\ln I_c$ 随 V_{BE} 变化最为线性的那一部分读出 V_{BE} 及相应的 I_c 数值, 这样可以通过调整 V_{BE} 的范围来补偿因温度改变带来的非线性关系, 使测量值始终满足集电极电流公式。在两个温度下做 $\ln I_c-V_{BE}$ 图, 得到两条直线, 通过对交点进行数据修正, 便可计算出较为精确的禁带变窄量。采用这种方法先后测量了 B 注入基区的硅双极器件和原位掺杂的锗硅基区双极器件, 其禁带变窄量分别为 41meV 和 125meV。

2 硅双极器件基区禁带变窄的计算

对于 n-p-n 硅双极晶体管, 在假定基区为均匀掺杂条件下, 集电极电流密度可简单表述如下^[4]:

$$J_{C(Si)}(T) = \frac{kT\mu_{nB}(T)n_{io}^2(T)}{N_{AB}(T)W_B(T)} \exp \frac{qV_{BE}}{kT} \exp \frac{\Delta E_{GB}}{kT} \quad (1)$$

金海岩 男, 1971 年出生, 博士研究生, 主要从事超高速电路和锗硅器件的研究。

张利春 男, 1939 年出生, 教授, 博士生导师, 目前主要从事多晶硅发射极超高速集成电路和锗硅异质结器件研究。

2000-06-08 收到, 2000-08-30 定稿

©2001 中国电子学会

其中 k 为玻尔兹曼常数; T 为温度; $\mu_{nB}(T)$ 为基区的少数载流子电子迁移率; $n_{io}(T)$ 为未掺杂材料的本征载流子浓度; $N_{AB}(T)$ 为基区激活的杂质浓度; $W_B(T)$ 为中性基区宽度; V_{BE} 为基极-发射极电压; ΔE_{GB} 为掺杂引起的基区禁带变窄量。

由于杂质冻结效应, 在低温下 $N_{AB}(T)$ 会降低, 从而导致内基区方块电阻增加, 这可用下式表达:

$$R_B(T) = \frac{1}{q\mu_{pB}(T)N_{AB}(T)W_B(T)} \quad (2)$$

其中 $\mu_{pB}(T)$ 是基区多数载流子空穴的迁移率。本征载流子浓度同温度的关系为^[4]:

$$n_{io}^2(T) = 4\left(\frac{2\pi k T}{h^2}\right)^3 (m_n m_p)^{\frac{3}{2}} \exp \frac{-E_G(T)}{kT} \quad (3)$$

其中 h 是普朗克常数; m_n, m_p 分别为电子和空穴的有效质量; $E_G(T)$ 为不掺 Si 的禁带宽度, 它是温度的函数。 $E_G(T)$ 随温度的变化可由下式表达^[5]:

$$E_G(T) = E_G(0) - \frac{\alpha T^2}{(T + \beta)} \quad (4)$$

其中 $E_G(0) = 1.170V$; $\alpha = 4.73 \times 10^{-4}$; $\beta = 636$ 。通过计算得到: $E_G(300) = 1124.5\text{meV}$, $E_G(77) = 1166.1\text{meV}$ 。将式(2)、(3)代入(1)中, 得到:

$$J_C(T) = 4g\left(\frac{2\pi}{h^2}\right)^3 (m_n m_p)^{\frac{3}{2}} (kT)^4 \mu_{nB}(T) \mu_{pB}(T) \times R_B(T) \exp \frac{qV_{BE} - E_G(T) + \Delta E_{GB}}{kT} \quad (5)$$

令 $f(T) = 4g\left(\frac{2\pi}{h^2}\right)^3 (m_n m_p)^{\frac{3}{2}} (kT)^4 \times \mu_{nB}(T) \mu_{pB}(T) R_B(T)$ (6)

则 $J_C(T) = f(T) \exp \frac{qV_{BE} - E_G(T) + \Delta E_{GB}}{kT}$ (7)

等式两边取对数, 有:

$$\ln J_C(T) = \ln f(T) + \frac{qV_{BE} - E_G(T) + \Delta E_{GB}}{kT} \quad (8)$$

对于一定的温度 T , $\ln J_C$ 与 V_{BE} 是线性关系, 斜率为 q/kT 。在实际测试中, 发现其理想因子随温度有微小的变化, 因此将式(8)修正为:

$$\ln J_C(T) = \ln f(T) + \frac{qV_{BE} - E_G(T) + \Delta E_{GB}}{nkT} \quad (9)$$

如果取两个温度点 T_1, T_2 , 可以获得两条直线:

$$\ln J_C(T_1) = \ln f(T_1) + \frac{qV_{BE} - E_G(T_1) + \Delta E_{GB}}{n_1 k T_1} \quad (10a)$$

$$\ln J_C(T_2) = \ln f(T_2) + \frac{qV_{BE} - E_G(T_2) + \Delta E_{GB}}{n_2 k T_2} \quad (10b)$$

两条直线的交点 V_{BE} 可令 $\ln J_C(T_1) = \ln J_C(T_2)$ 求

得:

$$qV_{BE} + \Delta E_{GB} = [n_1 n_2 k T_1 T_2 \ln \frac{f(T_2)}{f(T_1)} + n_2 T_2 E_G(T_1) - n_1 T_1 E_G(T_2)] / (n_2 T_2 - n_1 T_1) \quad (11)$$

令 $T_1 = 300\text{K}$, $T_2 = 77\text{K}$, 分别在这两个温度下测量硅基区双极器件的 Gummel 图, 取其中 I_C 随 V_{BE} 变化最为线性的一段数据(见表 1、2)做 $\ln I_C(T) - V_{BE}$ 图(见图 1)。因为 $\ln I_C$ 和 $\ln J_C$ 只相差一常数, 不影响交点 V_{BE} 的数值, 所以可以用 $\ln I_C$ 值代替 $\ln J_C$ 作图。

表 1 硅双极器件在室温(300K)下的 V_{BE} 与 I_C 关系

Table 1 Measurement Values of V_{BE} and I_C at 300K(for Si Base)

V_{BE}/mV	518	579	635	695	753	818
$I_C/\mu\text{A}$	0.001	0.010	0.100	1.00	10.0	100
$\ln I_C$	-6.91	-4.61	-2.30	0.00	2.30	4.61

表 2 硅双极器件在液氮温度(77K)下的 V_{BE} 与 I_C 关系

Table 2 Measurement Values of V_{BE} and I_C at 77K(for Si Base)

V_{BE}/mV	980	997	1015	1028	1045	1063
$I_C/\mu\text{A}$	0.0001	0.001	0.010	0.100	1.00	10.0
$\ln I_C$	-9.21	-6.91	-4.61	-2.30	0.00	2.30

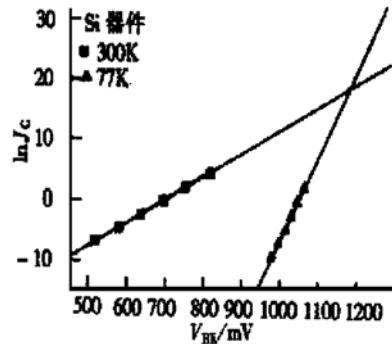


图 1 硅器件的 $\ln J_C(T) - V_{BE}$ 图

FIG. 1 $\ln J_C(T)$ Versus V_{BE} for Si Bipolar Transistor

通过计算机拟合, 我们得到两条直线:

$$Y = -147 + 0.141X \quad (12a)$$

$$Y = -27.0 + 0.039X \quad (12b)$$

解得交点 $X = 1179\text{mV}$, 对应公式(10), 可算出 $n_1 = 0.99$, $n_2 = 1.07$ 以及 $V_{BE} = 1179\text{mV}$ 。我们用来测试的硅器件基区掺杂浓度约为 $2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, 锗硅器件的基区掺杂浓度为 $1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 。结合 Swirhun 的实验数据^[6]和 Klassen 模型^[7], 可以得到如表 3 所示的数值。

表 3 液氮温度和室温下的迁移率比

Table 3 Ratio of Mobilities at 300K and 77K

基区掺杂/cm ⁻³	$\mu_{nB}(77)/\mu_{nB}(300)$	$\mu_{pB}(77)/\mu_{pB}(300)$	$R_B(77)/R_B(300)$
2×10^{18}	2.29	1.13	1.88
1×10^{19}	2.78	1.6	1

结合式(4), 可得到:

掺杂 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时:

$$\ln \frac{f(T_2)}{f(T_1)} = \ln \left[\frac{\mu_{nB}(77)}{\mu_{nB}(300)} \times \frac{\mu_{pB}(77)}{\mu_{pB}(300)} \times \frac{R_B(77)}{R_B(300)} \right] + 4 \ln \frac{77}{300} = -3.858$$

掺杂 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时:

$$\ln \frac{f(T_2)}{f(T_1)} = \ln \left[\frac{\mu_{nB}(77)}{\mu_{nB}(300)} \times \frac{\mu_{pB}(77)}{\mu_{pB}(300)} \times \frac{R_B(77)}{R_B(300)} \right] + 4 \ln \frac{77}{300} = -3.948$$

将相关的数据代入式(11), 可以解出: $\Delta E_{GB} = 41 \text{ meV}$, 这个结果与 Ashburn 利用 $\ln(J_c/J_0) - 1/T$ 图获得的 39 meV 的数据^[1]相一致.

3 铋硅双极器件基区禁带变窄的计算

如果 Si 基区由 SiGe 基区所代替, 则方程(4)变为^[2]:

$$J_{C(SiGe)}(T) = J_{C(Si)} \frac{N_c N_{V(SiGe)}(T)}{N_c N_{V(Si)}(T)} \times \frac{\mu_{nB(SiGe)}(T)}{\mu_{nB(Si)}(T)} \times \frac{\mu_{pB(SiGe)}(T)}{\mu_{pB(Si)}(T)} \exp \frac{\Delta E_g - \Delta E_s}{nkT} \quad (13)$$

其中 ΔE_g 为 SiGe 基区中由于 Ge 的引入而导致的禁带变窄量; ΔE_s 为基区 B 外扩而产生的寄生势垒; N_c, N_v 分别为导带和价带中的有效态密度.

$$\text{令 } C_{SiGe} = \frac{N_c N_{V(SiGe)}(T)}{N_c N_{V(Si)}(T)} \times \frac{\mu_{nB(SiGe)}(T)}{\mu_{nB(Si)}(T)} \times \frac{\mu_{pB(SiGe)}(T)}{\mu_{pB(Si)}(T)} \quad (14)$$

设 Si 和 SiGe 的有效态密度、迁移率随温度的变化规律相同, 则 C_{SiGe} 可认为是一与温度无关的常量. 则有:

$$J_{C(SiGe)}(T) = C_{SiGe} \times 4g \left(\frac{2\pi}{h^2} \right)^3 (m_n m_p)^{\frac{3}{2}} (kT)^4 \times \mu_{nB(Si)}(T) \mu_{pB(Si)}(T) R_B(T) \times \exp \frac{qV_{BE} - E_C(T) + \Delta E_{GB} + \Delta E_g - \Delta E_s}{nkT} \quad (15)$$

与上面 Si 基区的讨论相类似, 通过解两条直线的方程可得到:

$$qV_{BE} + \Delta E_{GB} + \Delta E_g - \Delta E_s = \frac{n_1 n_2 k T_1 T_2 \ln \frac{f(T_2)}{f(T_1)} + n_2 T_2 E_C(T_1) - n_1 T_1 E_C(T_2)}{n_2 T_2 - n_1 T_1} \quad (16)$$

$$\text{其中 } f(T) = C_{SiGe} \times 4g \left(\frac{2\pi}{h^2} \right)^3 (m_n m_p)^{\frac{3}{2}} (kT)^4 \times \mu_{nB(Si)}(T) \mu_{pB(Si)}(T) R_B(T) \quad (17)$$

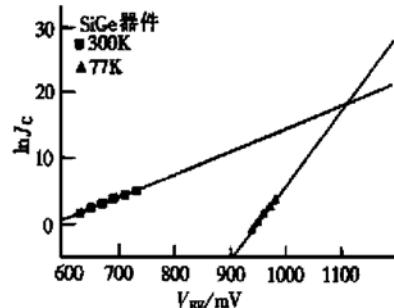
令 $T_1 = 300 \text{ K}$, $T_2 = 77 \text{ K}$, 分别在两温度下测量 $Si_{0.17}Ge$ 基区双极器件的 Gummel 图, 取其中 I_c 随 V_{BE} 变化最为线性的一段数据(见表 4、5)做 $\ln J_c(T) - V_{BE}$ 图(见图 2).

表 4 铋硅器件在室温(300K)下的 V_{BE} 与 I_c 关系Table 4 Measurement Value of V_{BE} and I_c at 300K
(SiGe Base)

V_{BE}/mV	630	650	670	690	710	730
$I_c/\mu\text{A}$	6.03	12.3	25.3	51.7	103	197
$\ln I_c$	1.80	2.51	3.23	3.95	4.64	5.28

表 5 铋硅器件在液氮温度(77K)下的 V_{BE} 与 I_c 关系Table 5 Measurement Value of V_{BE} and I_c at 77K
(SiGe Base)

V_{BE}/mV	940	950	960	970	980
$I_c/\mu\text{A}$	0.517	1.61	5.37	17.3	45.8
$\ln I_c$	-0.661	0.473	1.68	2.85	3.82

图 2 铋硅器件的 $\ln J_c(T) - V_{BE}$ 图FIG. 2 $\ln J_c(T)$ Versus V_{BE} for
SiGe Bipolar Transistor

通过计算机拟合, 得到两条直线:

$$Y = -107 + 0.113X \quad (18a)$$

$$Y = -20.3 + 0.035X \quad (18b)$$

解得交点 $X = 1110 \text{ mV}$. 对应公式(10), 可算出 $n_1 = 1.1$, $n_2 = 1.3$ 以及 $V_{BE} = 1110 \text{ mV}$. 将数据和表 3 的数值带入式(16), 最后求得:

$$\Delta E_{GB} + \Delta E_g - \Delta E_s = 125 \text{ meV}$$

这个结果同 Gibbons 采用做 $\ln(J_c/J_0) - 1/T$ 图求斜率的方法得到的 $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$ 基区的禁带变窄量 $120 \text{ meV}^{[8]}$ 较为一致。

如果器件在室温和液氮温度下的理想因子近似为 1, 则式(16)可简化为:

$$qV_{BE} + \Delta E_{GB} + \Delta E_g - \Delta E_s = \frac{kT_1 T_2 \ln \frac{f(T_2)}{f(T_1)} + T_2 E_G(T_1) - T_1 E_G(T_2)}{T_2 - T_1} \quad (19)$$

在 $T_1 = 300 \text{ K}$, $T_2 = 77 \text{ K}$ 时, 通过计算得到:

$$qV_{BE} + \Delta E_{GB} + \Delta E_g - \Delta E_s = 1216 \text{ meV} \quad (20)$$

对于基区掺杂为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的锗硅器件, 只要在室温和液氮温度下分别测量不同 V_{BE} 下的 I_C 值, 作图求出两条 $\ln I_C - V_{BE}$ 直线的交点, 代入式(20)便可方便地求出基区禁带变窄量。

4 结论

采用一种新的方法测量了双极器件中硅基区和锗硅基区的禁带变窄量, 这种方法采用 V_{BE} 做自变

量, 在室温和液氮温度下得到两条直线, 通过求解其交点, 再进行数据处理可得到禁带变窄量。与国外相同条件的测量结果相比, 证明这种方法的计算结果误差较小, 可满足实际的应用要求。

参考文献

- [1] P. Ashburn, H. Boussetta, M. D. R. Hashim *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1996, **43**: 774—783.
- [2] Benedicte Le Tron, M. D. R. Hashim, Peter Ashburn *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1997, **44**: 715—722.
- [3] I. M. Anteney, G. Lippert, P. Ashburn *et al.*, IEEE Electron Device Lett., 1999, **20**: 116—118.
- [4] D. B. M. Klassen, J. W. Slotboom and H. C. DeGraaff, Solid-State Electronics, 1992, **35**: 125—129.
- [5] C. D. Thurmond, J. Electronchem. Soc., 1975, **122**: 1133—1141.
- [6] S. E. Swirhun, D. E. Kane and R. M. Swanson, Temperature Dependence of Minority Electron Mobility and Bandgap Narrowing in p^+ Si, IEDM Tech. Dig., 1988, 298—301.
- [7] D. B. M. Klassen, Solid-State Electronics, 1992, **35**: 961—967.
- [8] J. F. Gibbons, C. A. King, J. L. Hoyt *et al.*, Si/Si_{1-x}Ge_x Heterojunction Bipolar Transistors Fabricated by Limited Reaction Processing, IEDM Tech. Dig., 1988, 566—569.

Electrical Determination of Bandgap Narrowing in Bipolar Transistors with Si and SiGe Bases

JIN Hai-yan and ZHANG Li-chun

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The apparent bandgap narrowing in bipolar transistors with ion implanted and epitaxial $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$ bases is measured using a new method. The bandgap narrowing is only obtained by measuring the electrical characteristics of the bipolar transistor at 300K and 77K under the condition of known μ_{nB} , μ_{pB} and R_B of the transistor. According to the temperature dependence on the collect current $I_C(T)$, a graph of $\ln I_C$ as a function of V_{BE} is plotted based on the data extracted from the linear region of the Gummel plot when the temperature keeping constant. Two lines of $\ln I_C - V_{BE}$ at the temperature of 300K and 77K, respectively are obtained. At the intersection of two lines, the values of bandgap narrowing in Si and $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$ bases to be 41meV and 125meV, respectively, are got by calculation which are in good agreement with the measured ones in the reference.

Key words: bipolar transistors; SiGe base; bandgap narrowing

EEACCC: 2560I: 7110: 2520M

Article ID: 0253-4177(2001)04-0456-04

JIN Hai-yan male, was born in 1971. He is a Ph. D student at the Institute of Microelectronics, Peking University. His research area is very high speed IC and SiGe heterojunction device.

ZHANG Li-chun male, was born in 1939. He is a professor and advisor at the Institute of Microelectronics, Peking University. His research interests are the development of very high speed poly-Si emitter bipolar IC and SiGe heterojunction devices.

Received 8 June 2000, revised manuscript received 30 August 2000

©2001 The Chinese Institute of Electronics