

GaAs/GaAlAs 双异质结光波导开关 内带隙的注入载流子感生变化

王德煌 王威礼

(集成光电子学国家重点联合实验室半导体所实验区 北京大学物理系 北京 100871)

庄婉如 林斐华

(集成光电子学国家重点联合实验室半导体所实验区 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 本文研究了 GaAs/GaAlAs 双异质结光波导开关内波导层带隙的载流子注入感生变化。给出了带隙变化值随注入载流子浓度变化的关系曲线，并与带填充理论和带隙收缩理论的计算结果进行了对比分析。

PACC: 4280L, 7820D, 7890

1 引言

GaAs 和 GaAlAs 材料都是半导体元器件最常用的基质。双异质结光波导结构是实用型光电子元器件，例如发光与激光、光双稳、光开关、光放大和光调制器件以及集成光电子学元器件设计所采用的基本结构。光波导结构的研究很多，一般研究光波导内的物理问题所用材料参数，包括带隙、光吸收系数和折射率等往往选取对应的体材料的实验数据或加以等效和拟合后决定^[1-3]。另一方面，设计具有光波导结构的元器件，例如光波导开关器件，所选取的结构和材料参数，包括带隙大小和折射率值，可能因为器件工艺流程差异而引起参数偏离设计值，而且在器件的不同工作条件下，其参数也会发生变化，进而影响器件工作特性。例如光波导开关设计要求其工作波长位于带隙附近的长波长端（即透明区），保证有较小的光损耗，同时有较大的折射率变化值，获得较好的光波导开关工作性能^[4-9]。如果光波导开关工作条件变化引起其带隙值改变，其结果将影响光波导开关性能或甚至失效，因而必须研究具有光波导结构的光电元器件在工作条件下其内部参数，例如带隙值的变化情形。本文报道 GaAs/GaAlAs 双异质结光波导开关的波导层，在不同浓度的载流子注入下，其带隙值变化的实验研究结果。并用已有理论模型进行对比分析研究。

2 实验

实验样品是 GaAs/GaAlAs 双异质结全内反射型光波导开关，其结构类似于同样材料制作的双异质结激光器或发光管的波导结构，采用类似制备发光与激光器件的工艺流程。光波导结构用液相外延技术生长构成。波导层约厚 $0.5 \mu\text{m}$ 。该层是不掺杂的 GaAs 材料，其杂质浓度约为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。两侧限制层分别是铝含量 0.30 的 GaAlAs 材料。芯片上制做欧姆接触金属电极后，解理和烧结在加工好的两面出光的热沉上，以利于电流的注入和器件散热，消除热效应的影响。光波导开关注入电流后用红外摄像管观察器件波导层发光现象，测量其室温发光谱线。其测量装置是由分辨率 0.1nm ，一级光谱范围 $700-2000\text{nm}$ 的光栅单色仪、近红外光电倍增管和 X-Y 记录仪等仪器组合而成。注入波导层的载流子浓度 n 值是采用双分子复合近似条件下，注入电流密度 J 与 n 值间的关系式计算得到^[10,11]：

$$n = (J/qdB)^{1/2}, \quad (1)$$

这里 q 是电子电荷。 d 是光波导层厚度，它由扫描电子显微镜测定。 B 是双分子复合系数，对 GaAs，室温下 $B = 8.6 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。测量不同 n 值对应的发光谱线，从其存在的峰值 λ_p ，用公式：

$$E_p = 1.2398/\lambda_p, \quad (2)$$

计算出 E_p 值。它与波导层材料带隙值 E_g ，对 GaAs 室温下 $E_g = 1.424$ 电子伏特（对应 $\lambda_g = 871\text{nm}$ ）的差值 $\Delta E_g = E_g - E_p$ 定义为载流子注入后波导层带隙值的相对变化值 ΔE_g 。显然它与注入载流子浓度 n 值有密切关系。

3 结果与讨论

图 1 是 GaAs/GaAlAs 双异质结光波导开关注入电流后，波导层有发光现象时，实验测得的典型的发光谱线。从图 1 可见，谱线上有一个极大值 λ_p 。它的大小随注入载流子浓度 n 值增加而减小，即移到短波端或 λ_p 位置蓝移。该现象常用带填充理论模型解释^[12,13]。实验测定不同 n 值的谱线，从其上面的 λ_p 值得到波导层带隙变化值 ΔE_g 。它与 n 值的关系如图 2 所示。可见， $n < 2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时， ΔE_g 值基本是个常数，约为 8meV。当 $n > 2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 后， ΔE_g 随 n 值呈递增变化规律。在所测量范围内， ΔE_g 均是正值。根据带填充理论模型，略去温度影响，假设波导层是 N 型材料，注入的载流子将填充导带附近的子能态，引起带隙增大，有 $\Delta E_g > 0$ ，其大小用下述公式可以近似得到^[2,12]：

$$\begin{aligned} \Delta E_g = kT & \left[\ln\left(\frac{n}{N_c}\right) + 3.53553 \times 10^{-1} \left(\frac{n}{N_c}\right) \right. \\ & - 4.95009 \times 10^{-3} \left(\frac{n}{N_c}\right)^2 \\ & \left. + 1.48386 \times 10^{-4} \left(\frac{n}{N_c}\right)^3 \right] \end{aligned}$$

$$= 4.42563 \times 10^{-6} \left(\frac{n}{N_e} \right)^4, \quad (3)$$

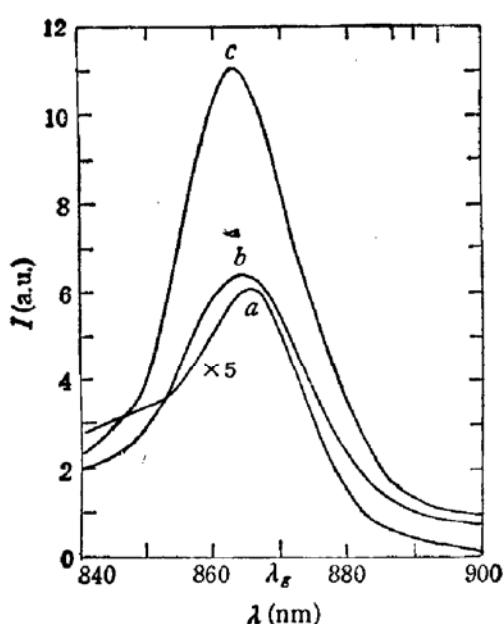


图 1 GaAs/GaAlAs 双异质结光波导开关注入载流子 n 后, 开关内波导层发光的典型谱线
a. $n = 2.13 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; b. $n = 3.69 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; c. $n = 4.09 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. I—相对强度. λ_g 是 GaAs 室温带隙波长

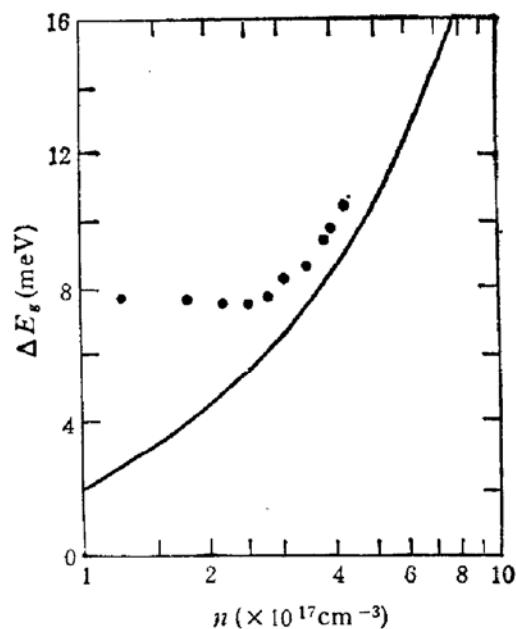


图 2 GaAs/GaAlAs 双异质结光波导开关内波导层带隙变化值 ΔE_g 与注入载流子浓度 n 的关系 ●是实验数据 实线是带填充理论模型的数值计算结果

这里绝对温度 T 值取室温 (300K), k 是玻尔兹曼常数. N_e 是导带内有效态密度:

$$N_e = 2(m_e k T / 2\pi\hbar^2)^{3/2}, \quad (4)$$

其中 \hbar 是普朗克常数. m_e 是电子有效质量. 对 GaAs, $m_e = 0.067 m_0$, m_0 是电子静止质量. 图 2 也表示了用(3)和(4)式进行数值计算的结果. 对比实验与理论的结果, 发现注入载流子浓度 n 值小于 $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的区域内, 带填充理论模型不能解释波导层带隙变化与 n 值基本上无关而是一个常数的实验结果. 对于 n 值大于 $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的区域, 带填充理论可以较满意地说明波导层带隙变化值 ΔE_g 随注入载流子浓度 n 值的递增变化规律. 这可能是以前人们用带填充理论模型解释蓝移现象的根据. 实验测量另外一个样品的 $\Delta E_g - n$ 的关系曲线, 其结果如图 3 所示. 图 3 和图 2 的样品不同是观察发光现象时, 前者要注入较大电流, 才看到波导层出现发光现象. 因而对应的注入载流子浓度 n 值约大一个量级. 从图 3 可见, ΔE_g 随 n 变化的规律类似于图 2 所示. $n < 2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的区间内, ΔE_g 也近似是常数, 约为 30 meV. 在 $n > 2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 区间, ΔE_g 值随 n 值递增变化, 但变化趋势较图 2 所示的要平缓些. 用上述带填充理论公式(3)和(4)计算的结果如图 3 的曲线 a 所示. 与实验结果对比, 表明带填充理论模型难于说明 ΔE_g 随 n 的变化规律. 显然在这个样品内, 还有其它效应例如温度效应和带隙收缩效应对波导层带隙的影响. 带隙收缩效应的实验和理论研究表明, 如果注入载流子浓度 n 值足够大, 电子波函数会重迭而形成电子气, 电子间库仑相互排斥作用加上电子自旋, 结果是电子气屏蔽作用降低了导带边能量, 出现带隙重正化 (Renormalization) 即带隙收缩效应^[14,15]. 它产生的带隙变化值 $\tilde{\Delta E}_g$ 是负值且与注入载流子浓度 n 值有下述关系:

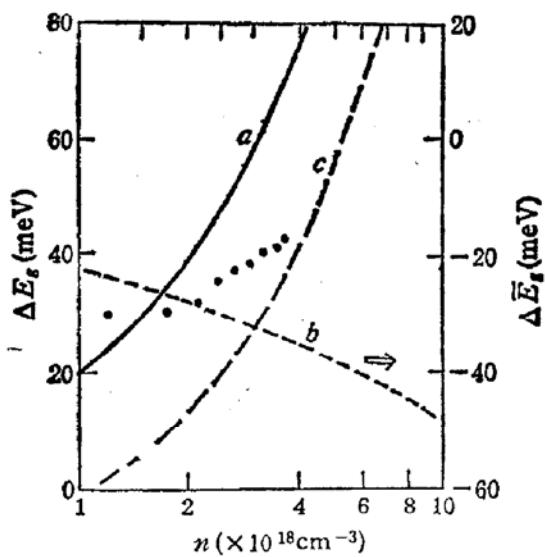


图 3 GaAs/GaAlAs 双异质结光波导开关内波导层带隙变化值 ΔE_g 与注入载流子浓度 n 的关系 ●是实验数据 曲线 a 是带填充理论计算结果 曲线 b 是带隙收缩理论计算结果 曲线 c 是综合 a 和 b 两个理论模型计算结果

$$\Delta \tilde{E}_g = -\left(\frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_s}\right)\left(\frac{3}{\pi}\right)^{1/3} n^{1/3}, \quad (5)$$

其中 ϵ_0 是真空介电常数。 ϵ_s 是半导体相对介电常数，对 GaAs， $\epsilon_s = 13.1$ 。图 3 的曲线 b 表示(5)式计算的结果。从图可见， $\Delta \tilde{E}_g$ 是负值而且它随 n 值的变化规律也与实验结果不同。如果综合考虑带填充和带隙收缩两种模型（见图 3 的曲线 c ），也不能解释这个样品的实验结果。在所测量的范围内，因 n 值而产生的 ΔE_g 值变化是在曲线 a 与 c 之间。除上述两种效应外，还有温度的影响，如果样品散热性能不良或者波导层质量欠佳，注入电流将在波导层内产生焦尔热，引起温度升高，而温度对带隙将产生影响，根据理论与实验研究结果，温度感生的带隙变化值也是负的，而且带隙变化值的变化规律也与实验结果不一致^[16]。综上所述，图 3 所示实验结果可能还与其它因素有关，例如异质结界面、层应力，载流子与声子相互作用，波导层非完整性等，对此尚待进一步研究。

4 结论

实验研究 GaAs/GaAlAs 双异质结光波导开关波导层的带隙随注入载流子浓度的变化。结果表明，对一个样品，注入载流子浓度小于 $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时，带隙变化值近似为 8 meV 的常量。对另一样品，注入载流子浓度小于 $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时，带隙变化值近似为 30 meV 的常数。这结果已有理论模型不能解释。带填充理论能解释第一个样品在注入载流子浓度大于 $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时，感生的带隙变化值的变化规律。但是带填充理论和带隙收缩理论不能解释另一个样品在注入载流子浓度大于 $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时，感生的带隙变化值的变化规律，表示该样品的波导层带隙变化值，可能与温度效应、应力和非均匀性等因素有关，对此尚待进一步研究。上述实验结果对具有双异质结光波导结构的光电子元器件，尤其是光波导开关器件的设计和制作以及使用都将有实际参考价值。

参 考 文 献

- [1] H. Kessel, J. K. Butler, *Semiconductor Lasers and Heterostructure LED's*, New York: Academic Press, 1977.
- [2] H. C. Casey, Jr., M. B. Panish, *Heterostructure Lasers, Part A*, New York: Academic Press, 1978.
- [3] 董孝义, *光波电子学*, 南开大学出版社, 1987.
- [4] 许政权, *介质光波导器件原理*, 上海交通大学出版社, 1989.
- [5] 青木昌治, *化合物半导体テバイス*, 日本東京出版社, 1973, 342.
- [6] W. K. Burns, *J. Lightwave Technology*, 1988, **6** (6): 1051.
- [7] Y. Okada, R. -H. Yan, L. A. Coldren, J. L. Merz and K. Tada, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25** (4), 713.
- [8] K. Shimomura, Y. Suematsu and S. Arai, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26** (5): 883.
- [9] 王德煌, *中国激光*, 1993, **20**(1): 21.
- [10] S. Tarucha, Y. Horikoshi and H. Okamoto, *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.*, 1983, **22**: L482.
- [11] 王德煌, *中国激光*, 1988, **15**(12): 707.
- [12] E. Burstein, *Phys. Rev.*, 1954, **93**: 632.
- [13] T. S. Moss, G. J. Burrell and B. Ellis, *Semiconductor Opto-electronics*, New York: Wiley Press, 1973.
- [14] P. A. Wolff, *Phys. Rev.*, 1962, **126**, 105.
- [15] H. S. Bennett and J. R. Lowney, *J. Appl. Phys.*, 1987, **62**: 521.
- [16] 虞丽生, *半导体异质结物理*, 科学出版社, 1990, 14.

Injected Carrier-induced Band-Gap Change in GaAs/GaAlAs Double Heterostructure Waveguide Optical Switch

Wang Dehuang and Wang Weili

(*Semiconductor Institute Region, National Integrated Optoelectronics Laboratory, Department of Physics, Peking University, Beijing 100871*)

Zhuang Wanru and Lin Wenhua

(*Semiconductor Institute Region, National Integrated Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*)

Abstract The injected carrier-induced band-gap change in GaAs/GaAlAs double heterostructure waveguide optical switch has been studied. The curves between the band-gap change values and injected carrier concentrations are shown. The experimental results is compared with the computed results by using the band-filling theory and band-gap shrinkage theory.

PACC: 4280L, 7820D, 7890