

GaAs 膜内注入载流子感生的折射率相对变化谱及其对光开关特性的影响

王德煌

(北京大学物理系, 国家集成光电子学联合实验室半导体所区, 北京 100871)

提要 实验测量了不掺杂 GaAs 膜内注入载流子感生的 820~900 nm 波段反射率相对变化谱, 从而得到对应的折射率相对变化谱, 并分析其对光开关特性的影响。

关键词 GaAs 膜, 注入载流子, 折射率变化, 光开关

Relative refractive index variation spectra of a GaAs film and its effect on optical switch characteristic

Wang Dehuang

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

Abstract The relative variation spectra of reflectivity induced by injected carrier in an undoped GaAs film at 820~900 nm ranges are measured experimentally. The relative variation spectrum of refractive index are also obtained using above results. The above results effect on optical switch characteristic are analyzed.

Key words GaAs film, injection carrier, refractive index change, optical switch

本文报道采用常规的反射谱法, 测量金属有机物气相外延(MOVPE)技术生长的不掺杂 GaAs 膜内, 注入载流子感生的近红外反射率相对变化谱, 采用电磁波理论得到对应的折射率相对变化谱, 用所获结果分析注入载流子感生折射率相对变化量对采用半导体膜结构的光开关特性的影响。

1 实验与结果

实验研究半导体内, 外场作用感生的光学非线性现象与规律的常规方法有光吸收谱^[1,2]、光电流谱^[3,4]和反射谱^[5]等。为了避免生长半导体膜的衬底对该膜性质研究过程的干扰, 采用

较简易的反射谱测量方法。

实验装置是由稳压溴钨灯、近红外单色仪和光电倍增管、记录仪和数字多用表等仪器组成。样品用 MOVPE 技术在掺铟的半绝缘 GaAs(100) 衬底上生长的 GaAs 膜, 其膜厚、室温带隙和本底载流子浓度分别用 SEM、光荧光和范德堡法测定。在近似镜面的样品表面制作一对金属接触电极。注入 GaAs 膜(以下简称膜)内的载流子浓度 N 是在带间双分子复合近似和 N 大于膜的本底载流子浓度 N_0 的条件下, 从 N 与注入电流密度 J 的关系式计算得到^[6-7]

$$N = [J/(qBd)]^{1/2} \quad (1)$$

其中 q 是电子电荷, d 是膜厚, B 是双分子复合系数, 对 GaAs, $B = 8.0 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$ ^[7]。

根据电磁波理论, 单色平面波垂直入射到膜表面, 其功率反射谱为^[8]

$$R(\lambda) = [(n-1)^2 + K^2]/[(n+1)^2 + K^2] \quad (2)$$

其中 λ 是入射光波长, n 和 K 分别是膜的折射率和消光系统。微分上式得

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{4(n^2 - K^2 - 1)\Delta n + 8nK\Delta K}{[(n+1)^2 + K^2][(n-1)^2 + K^2]} \quad (3)$$

可见除了 n 和 K 对功率反射率相对变化 $\Delta R/R$ 谱有影响外, 注入载流子感生的折射率变化量 Δn 和消光系数变化量 ΔK 对 $\Delta R/R$ 谱也有贡献。考虑实验研究波段是带隙附近的近红外区 820 ~ 900 nm, 有 $n \gg K$ ^[9], 上式改写为

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{n^2 - 1}{4n} \frac{\Delta R}{R} \quad (4)$$

注意到折射率 n 一般是波长和温度的函数, 根据 Sellmeier 公式, 对 GaAs 膜有^[10]

$$n(\lambda) = [8.950 + 2.054\lambda^2/(\lambda^2 - 0.390)]^{1/2} \quad (5)$$

可见从实验测量的 $\Delta R/R$ 谱可以确定对应的折射率相对变化 $\Delta n/n$ 谱。

图 1 给出实验测量 0.60 μm GaAs 膜的注入载流子感生的 $\Delta R/R$ 谱。根据文献[5], 只要入射角小于 10° , 就可以采用垂直入射的反射公式, 因此在 3° 入射角下实验测量, 估计引入误差不

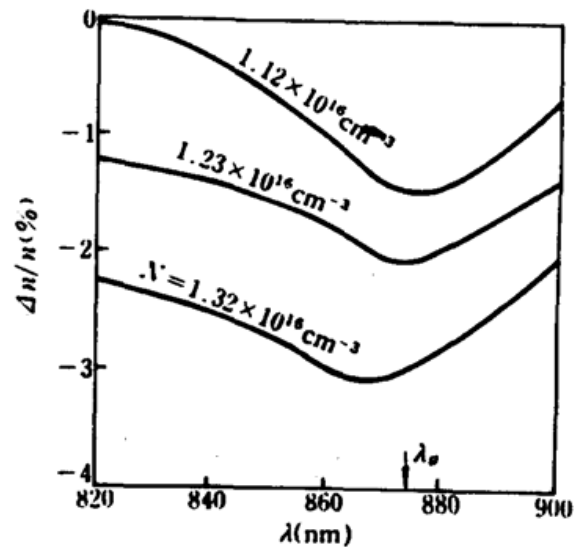
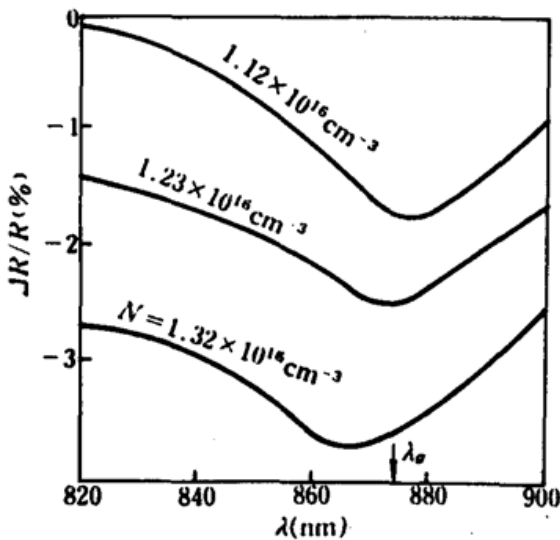


Fig. 1 Near-infrared relative variation ($\Delta R/R$) spectra of reflectivity of an undoped GaAs film with 0.60 μm thickness induced by injected carriers (N)

Fig. 2 Near-infrared relative variation ($\Delta n/n$) spectra of refractive index of an undoped GaAs film with 0.60 μm thickness induced by injected carriers (N) from equation (4) and Fig. 1

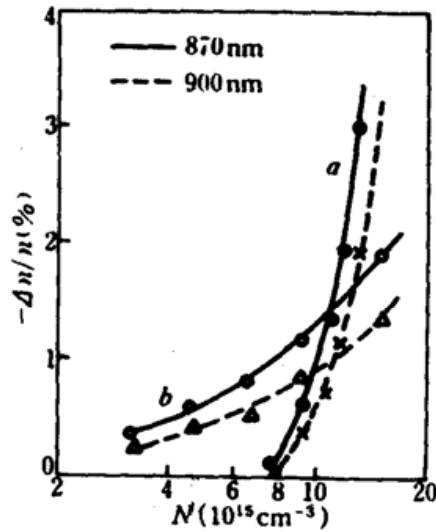
大于 0.001。图 2 是用(4)式从图 1 确定该样品注入载流子感生的折射率相对变化 $\Delta n/n$ 谱。从

两幅图可知,载流子注入感生的 $\Delta R/R$ 和 $\Delta n/n$ 都是负值。其绝对值随注入载流子浓度 N 增加而明显增大。在 $\Delta R/R$ 谱和 $\Delta n/n$ 谱上都存在一个峰值,出现在带隙 λ_g 附近,其位置随 N 值增加而移向短波端,即发生蓝移。它与 Burstein-Moss 现象相似,说明 GaAs 膜内载流子注入引起光吸收系数的变化^[11]。

图 3 给出厚度 d 分别为 $0.60 \mu\text{m}$ 和 $2.24 \mu\text{m}$,本底载流子浓度 N_0 分别为 $9.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 和 $3.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 的两种不掺杂 GaAs 膜,在不同波长 λ 处, $\Delta n/n$ 值随注入载流子浓度 N 的变化关系图。从图可见, N 增加引起 $\Delta n/n$ 值非线性变化的增大。较厚的 $2.24 \mu\text{m}$ 的膜内, $\Delta n/n$ 值变化较缓慢。这可能是膜越薄,注入载流子引起的电子-空穴间库仑相互作用越强,因而光吸收系数相对变化也较大的缘故^[12]。

Fig. 3 Relative variation $\Delta n/n$ of refractive index induced by injected carriers as a function of the injected carrier concentration N in two GaAs film at a fixed wavelength

a— $d = 0.60 \mu\text{m}$, $N_0 = 9.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$
b— $d = 2.24 \mu\text{m}$, $N_0 = 3.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$



2 GaAs 膜结构光开关特性分析

薄膜结构的光开关是典型的实用集成光电子元件之一,其中已研制成功的 GaAs/GaAlAs 载流子注入型光开关,其主要物理基础是注入载流子感生的折射率变化^[13]。现利用上节所给结果,分析其对 GaAs 膜结构光开关特性主要是反射特性的影响。为便于分析,简化文献[13]的图 1 结构为图 4 所示。层 1 和 2 分别是 GaAs 限制层和 GaAs 波导层。设无载流子注入时,其折射率均为 n 且无损耗($\alpha = 0$)。从层 1 入射的光波将直通穿过层 2。如文献[13]所示,利用异质结结构使载流子注入到层 2,使其折射率变为 $n + \Delta n$ 且 $\Delta n < 0$,同时层 2 的损耗 α 不为零值,因而层 1 和 2 间出现介电界面。根据光学理论,在层 1 内以入射角 θ 入射的光波被界面反射,其功率反射率 R 为

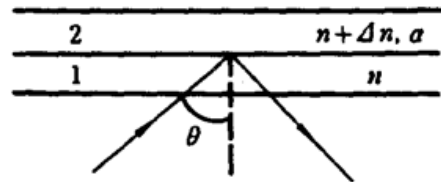


Fig. 4 Schematic view of on-off region in a carrier injection type optical switch a multilayers GaAs films structure

$$R = \frac{(n \cos \theta - u)^2 + v^2}{(n \cos \theta + u)^2 + v^2} \quad (6)$$

其中 u 和 v 分别是

$$2u^2 = [(n + \Delta n)^2 - K^2 - (n \sin \theta)^2] + \sqrt{[(n + \Delta n)^2 - K^2 - (n \sin \theta)^2]^2 + [2(n + \Delta n)K]^2} \quad (7)$$

$$2v^2 = -[(n + \Delta n)^2 - K^2 - (n \sin \theta)^2] + \sqrt{[(n + \Delta n)^2 - K^2 - (n \sin \theta)^2]^2 + [2(n + \Delta n)K]^2} \quad (8)$$

$$K = (\alpha/4\pi)\lambda \quad (9)$$

另外,实用型光开关性能指标有时用反射损耗 L_r 表示,且

$$L_r = 10 \log_{10}(1/R) \quad (\text{dB}) \quad (10)$$

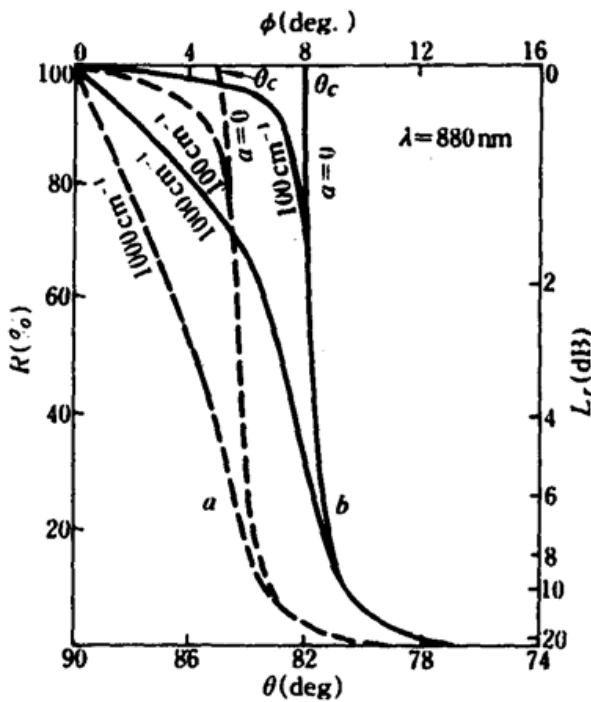


Fig. 5 Power reflectivity R and reflection loss as a function of the incidence angle θ in an optical switch for the different $\Delta n/n$ and α values at 880 nm
a— $\Delta n/n = -0.5\%$; b— $\Delta n/n = -1.0\%$

可见 GaAs 膜内注入载流子感生的折射率相对变化量 $\Delta n/n$ 对光开关反射特性有影响。图 5 说明其影响程度。从图可见,光开关最佳工作状态是无损耗 ($\alpha = 0$) 时明显出现全反射情形。此时对应的入射角是临界角 θ_c , 如图 5 标记位置。 $\Delta n/n$ 值越大,其对应的 θ_c 值也越大。如果用光开关器件设计参数交叉角 2ϕ 来表示,文献[13]给出 2ϕ 与本文图 4 的入射角 θ 有如下关系

$$\phi = \pi/2 - \theta \quad (11)$$

可见,交叉角 2ϕ 和 $\Delta n/n$ 值必须为某定值时,光开关才明显出现全反射情形,或者功率反射率 R 值较大和反射损耗 L_r 值较小。因而除设计光开关时重视上述参数外,使用光开关时也应充分注意和控制注入载流子浓度与 $\Delta n/n$ 值关系,保证设计的交叉角值满足产生全反射现象所需入射角值,使光开关处于比较好的工作状态。另外从图可见,光开关器件使用时其工作波长应选择在带隙 λ_g 附近的长波端,尽量减小注入载流子在 GaAs 膜内产生的损耗 α 值。

作者衷心感谢段树坤同志提供实验样品,王威礼同志、庄婉如同志和林雯华同志支持本项研究。

参 考 文 献

- 1 王德煌,段树坤 *et al.*, 半导体学报, 12(10), 506(1991)
- 2 D. A. B. Miller *et al.*, *Phys. Rev. B*, 32(2), 1043(1985)
- 3 虞丽生, 半导体异质结物理, 科学出版社, 1990, 55
- 4 滕达,徐仲英 *et al.*, 半导体学报, 11(2), 210(1990)
- 5 R. K. Willardson, A. C. Beer (ed), *Semiconductors and Semimetals*, 9, Academic Press, New York, 1972, 32
- 6 H. Kessel, J. K. Butler, *Semiconductor lasers and Heterostructure LED's*, Academic Press, New York, 1977, 256
- 7 王德煌, 中国激光, 15(12), 707(1988)
- 8 M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergaman Press, Germany, 1975, 627

- 9 青木昌治 主编, 化合物半导体デバイス, 东京出版社, 东京, 1973, 342
- 10 J. Buus, M. J. Adams, *Solid state and Electron Devices*, **3**, 189(1979)
- 11 T. S. Moss, G. J. Burrell, B. Ellis, *Semiconductor Opto-Electronics*, Wilay Press, New York, 1973, 84
- 12 黄昆, 物理, **15**(6), 329(1986)
- 13 F. Ito, M. Matsuura, T. Tanifuji, *IEEE J. Quant. Electr.*, **25**(7), 1677(1989)

大家共同努力办好《中国激光》

依靠广大作者、读者和各级领导部门的合作和支持,《中国激光》的办刊质量不断获得提高。1992年本刊被列为我国自然科学核心期刊,在世界重要检索系统中也榜上有名。这一年本刊还获得国家科委、中国科学院优秀科技期刊二等奖,上海市科委、上海市新闻出版局、上海市科协联合授予优秀科技期刊称号。这是大家共同努力的结果。我们要特别感谢编委们和审稿人对我们工作的支持,他们为办好《中国激光》付出了辛勤的劳动。经过评议,下列同志被评为1992年度本刊优秀编委和优秀审稿人。我们殷切希望广大科技工作者、各级领导继续给予积极的支持和合作,使本刊能更上一层楼。

《中国激光》编辑部

优秀编委(按姓氏笔划为序)

刘立人 吕百达 庄婉如 杨正名 陈英礼 梁培辉 夏慧荣

优秀审稿人(按姓氏笔划为序)

方祖捷 过巴吉 朱祖昌 刘江龙 伍小平 关世荣 苏宝熔
吴光照 李先枢 余国贤 陈钟鸣 范琦康 范正修 董孝义