

# $Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe$ 量子限制 Stark 效应光调制器\*

唐九耀

(浙江大学物理系 杭州 310027)

川上养一 藤田茂夫

(日本京都大学电子科学和工程学系 京都 606 日本)

**摘要** 研究了  $Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe$  多量子阱 Stark 效应光调制器的研制及其在室温下的光学特性, 包括透射谱、反射谱以及在不同外场作用下的微分透射谱和微分反射谱, 指出了这类调制器目前可以达到的调制幅度, 及可能的应用前景.

**关键词:** 光调制器,  $ZnCdSe/ZnSe$ , 量子限制, Stark 效应

**PACC:** 7135

**文章编号:** 0253-4177(2000)01-0079-06

## $Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe$ Quantum-Confined Stark Effect Photomodulator\*

TANG Jiu-yao

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Y. Kawakami and Sg. Fujita

(Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University, Kyoto 606, Japan)

Received 14 September 1998

**Abstract** The preparation and optical properties of  $Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe$  quantum-confined Stark effect photomodulator are reported in this paper, including its transmission, reflection, differential transmission and differential reflection spectrum at room temperature. The present modulation amplitudes and possible applications of this kind of modulator are also indicated.

\* 国家教委留学归国人员科研基金资助项目(Project Supported by Research Foundation of Chinese National Education Committee).

唐九耀 男, 1947 年出生, 副教授, 现在主要从事半导体物理和半导体光电子器件方面的研究工作.  
1998-09-14 收到

**Key Words:** Photomodulator, ZnCdSe/ZnSe, Quantum-Confinement, Stark Effect

**PACC:** 7135

**Article ID:** 0253-4177(2000)01-0079-06

## 1 引言

外电场对半导体能带边缘光吸收的影响(即电吸收现象)人们已作了不少的研究.在体材料半导体中由电吸收导致的吸收边的移动和展宽被称为 Franz-Keldysh 效应.在多量子阱结构中,由于准二维的量子限制增强了激子的结合能以及激子的跃迁强度,使得激子在多量子阱电吸收过程中起着比在三维情况下更加重要的作用.当沿着与量子阱平面垂直的方向施加一个外电场时,由于量子阱势垒的畸变,电子和空穴子能带的能级将会向能量减小的方向移动,电子和空穴波函数的交迭也会减少,这样就会引起相应的激子光吸收能量的红移和光吸收强度的减弱.量子阱中的这种现象就是所谓的量子限制 Stark 效应(QCSE)<sup>[1,2]</sup>.宽带 II-VI 族量子阱中的激子由于其有较大的结合能和屏蔽域值,因而在线性和非线性光吸收及光受激发射的过程中起了重要的作用<sup>[3-5]</sup>.1993 年, Kawakami 等人用生长在 n 型 GaAs 衬底上的 Zn<sub>0.8</sub>Cd<sub>0.2</sub>Se/ZnSe 多量子阱研制了第一个 II-VI 族 QCSE 光调制器,其最大的微分透射率接近 10%<sup>[6,7]</sup>.本文将报道生长在 p 型 GaAs 衬底上的 Zn<sub>0.87</sub>Cd<sub>0.13</sub>Se/ZnSe 多量子阱 QCSE 光调制器及其光学特性.

## 2 实验

ZnCdSe 多量子阱是由固源 MBE 生长在 p<sup>+</sup> 型 GaAs(001) 衬底上,并和 p-ZnSe 层、n<sup>+</sup>-ZnSe 层一起构成了 p-i-n<sup>+</sup> 多量子阱异质结,如图 1 所示.为了避免在 p-ZnSe 层上制备欧姆接触的困难,p-ZnSe 是作为缓冲层生长在 p<sup>+</sup> 型 GaAs 衬底上,由微波 N<sub>2</sub> 等

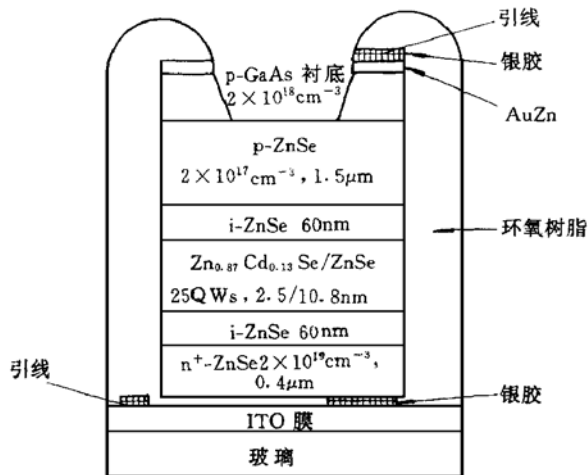


图 1 p-i-n<sup>+</sup> ZnCdSe/ZnSe 多量子阱异质结光调制器的示意图

FIG. 1 Diagram of Photomodulator with p-i-n<sup>+</sup> ZnCdSe/ZnSe MQW Heterojunction

离子体实现 p 型掺杂.重掺杂的 n<sup>+</sup>-ZnSe 则生长在多量子阱的上面,由 ZnCl<sub>2</sub> 作为掺杂剂而形成 n 型掺杂.如图 2 所示,在没有外场的情况下,这种 p-i-n<sup>+</sup> 多量子阱异质结有两个能带弯曲的区域,一个在 p<sup>+</sup>-GaAs/p-ZnSe 的界面上(同型异质半导体高低结),另一个在 p-ZnSe 和 n<sup>+</sup>-ZnSe 之间(p-i-n<sup>+</sup> 结).当多量子阱异质结(p-i-n<sup>+</sup> 结)处于反偏的情况下,p<sup>+</sup>-GaAs/p-ZnSe 同型异质高低结则处于正偏;而当多量子阱异质结处于正偏的情况下,p<sup>+</sup>-GaAs/p-ZnSe 结则处于反偏,因而可以在一个相当宽的电压范围内对此多量子阱异质结施加一个外场而不至产生很大的漏电流.

为了加上外电场,在多量子阱样品的两边用蒸发方法制备了电极. AuZn(10% Zn) 合金作为衬底 p<sup>+</sup>-GaAs 的电极,而 In 则作为表面层 n<sup>+</sup>-ZnSe 的电极.在进行透射测量时,多量子阱样品用导电银胶和环氧树脂固定在透明导电膜(ITO)覆盖的玻璃上,并用选择性腐蚀的方法在 GaAs 衬底上开了一个直径~2mm 的孔,其结构如图 1 所示.在进行调制器的反射特性测量时,Al 反射膜用真空

蒸发的方法淀积在玻璃的后表面上,以便把调制透射的测量结果和调制反射的测量结果直接进行比较.

多量子阱光调制器的透射测量是在光正入射的情况下进行的.为了在正入射的情况下进行反射测量,在与光调制器成  $45^\circ$  角的方向使用了分束片.碘钨灯发出的光经单色仪分光后投射在调制器的表面上,其功率密度为几个  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .在测量调制器的透射谱和反射谱时,用斩波器来调制入射光的强度;在测量微分透射谱和微分反射谱时,则用脉冲发生器来提供矩形的调制电压.透射和反射后的光信号由 Si 光电二极管接受,经预放和锁相放大后的测量结果由微机自动采集、存储和显示.

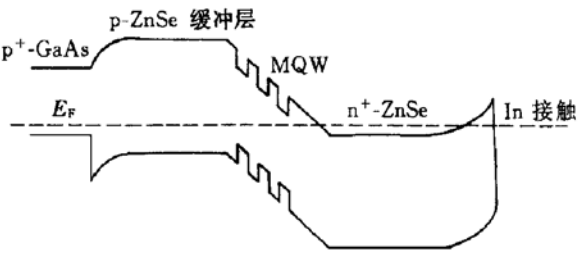


图 2  $\text{p-i-n}^+$   $\text{ZnCdSe}/\text{ZnSe}$  多量子阱异质结的能带图  
FIG. 2 Energy Band of  $\text{p-i-n}^+$   $\text{ZnCdSe}/\text{ZnSe}$  MQW Heterojunction

### 3 结果和讨论

#### 3.1 透射谱和微分透射谱

$\text{Zn}_{0.87}\text{Cd}_{0.13}\text{Se}/\text{ZnSe}$  多量子阱光调制器在室温下的透射谱如图 3 所示.透射谱可分为三个部分.在  $464\text{nm}$  以前的区域,由于势垒  $\text{ZnSe}$  带间的强吸收其透射率几乎为零.从  $464\text{nm}$  到  $482\text{nm}$  是势阱  $\text{ZnCdSe}$  激子的吸收区域.经过与光电流谱的比较,可以分辨出二个激子的吸收峰  $E_{x11hh}$  和  $E_{x11lh}$ .在  $480\text{nm}$  以后的区域透射率可高达  $80\%$ ,这是弱吸收的区域,并且伴随有干涉条纹的出现.

当沿着与多量子阱平面垂直的方向加上一外电场后,由于量子限制的 Stark 效应, $\text{ZnCdSe}$  激子的吸收峰位和吸收强度都要发生变化,这样就引起了多量子阱光调制器透射率的变化.因而当对调制器加上一个  $2\text{kHz}$  的反偏矩形调制电压时,可以得到如图 4 所示的微分透射谱  $\Delta T/T$ .它由一个峰和两边的两个谷组成.对于比较小的调制电压(例如  $-2\sim 0\text{V}$ ),中央峰呈现为一个主峰和一个小峰,分别对应于  $E_{x11hh}$  和  $E_{x11lh}$ .

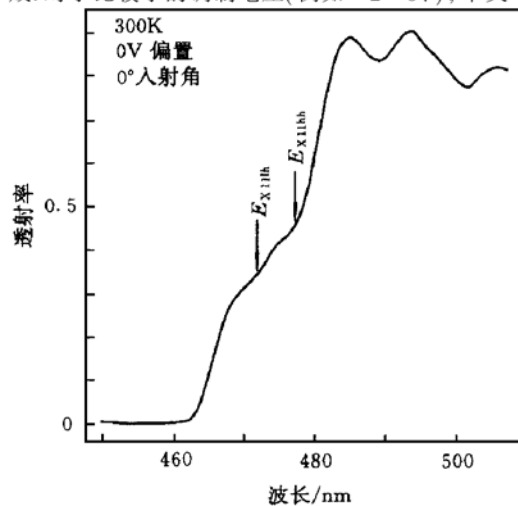


图 3  $\text{ZnCdSe}/\text{ZnSe}$  多量子阱光调制器的透射谱

FIG. 3 Transmission Spectrum of  $\text{ZnCdSe}/\text{ZnSe}$  MQW Photomodulator

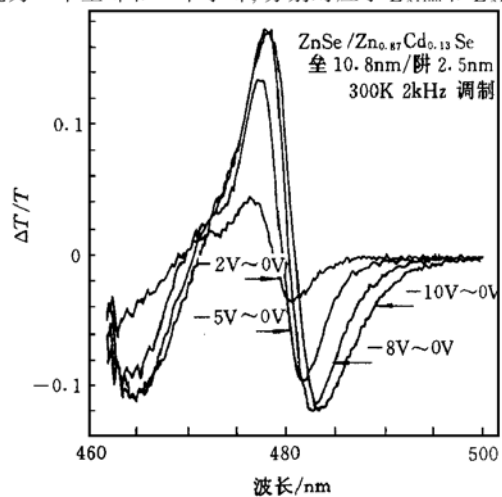


图 4  $\text{ZnCdSe}/\text{ZnSe}$  多量子阱光调制器的微分透射谱

FIG. 4 Differential Reflection Spectrum of  $\text{ZnCdSe}/\text{ZnSe}$  MQW Photomodulator

的激子吸收. 当调制电压逐渐增大时, 对应于  $E_{\text{exc}}$  激子吸收的小峰则逐渐演变为主峰的一个肩. 同时正如 QCSE 效应所预期的那样, 随着所加外场的增大, 微分透射率的值  $\Delta T/T$  逐渐增大, 其峰位逐渐向长波长侧移动, 而峰的半高宽则逐渐增加. 在  $-8 \sim 0\text{V}$  的调制电压下,  $\Delta T/T$  在  $478\text{nm}$  附近达到极大, 为  $17\%$ .

### 3.2 反射谱和微分反射谱

制备多量子阱反射调制器的一个方法是在衬底和多量子阱之间加上一个介质多层反射镜, 就象 Boyd 等人在  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  多量子阱反射调制器中所做的那样<sup>[8]</sup>. 多层介质膜由  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (作为高折射率材料) 和  $\text{AlAs}$  (作为低折射率材料) 构成, 并且也由 MBE 生长. 但对于宽带 II-VI 族材料而言, 由于缺少既有大的折射率差, 又能晶格匹配的材料, 生长高质量的多层介质反射镜并非易事. 作为一种简单的替代方法可以在多量子阱的表面蒸发一层金属反射膜(如 Al 膜). 与上面那种方法不同的是, 在这种有金属反射膜的调制器里, 由于光不是从多量子阱的表面而是从不透明的衬底入射到调制器, 因而仍然需要在衬底上开一个窗口.

为了比较透射型调制器和反射型调制器的调制性能, 我们在透射型调制器的调制特性测完以后, 立即在调制器的玻璃表面上蒸发了一层 Al 反射膜. 这种结构反射型调制器和上面那种的区别只在于被调制的光束是从玻璃的后表面而不是从玻璃的前表面(即多量子阱的表面)反射回来. 因而在这种结构的反射型调制器里, 从调制器前表面反射的光束和从 Al 镜反射的光束之间不存在干涉现象, 但这样也便于把其调制特性和透射型调制器的调制特性进行比较.

正入射时反射型调制器的反射谱如图 5 所示. 在  $464\text{nm}$  以前, 调制器的反射率几乎不变, 约为  $5.5\%$ . 由于这个区域的透射率近似为零(如图 4 所示), 因而这个区域的反射光都来自调制器前表面的反射. 在  $464\text{nm}$  到  $482\text{nm}$  的区域来自调制器前表面的反射率约占  $6\% \sim 7\%$ . 其余则来自 Al 膜反射镜的反射. 因而平均而言这两部分反射光束的强度大致相等. 由于被调制的光束在多量子阱中通过了两次, 因而在反射谱中量子阱激子的吸收特征更加明显. 在  $482\text{nm}$  以后, 来自调制器前表面的反射约占  $10\% \sim 12\%$ , 其余均来自被 Al 膜反射的调制光束. 由于这是一个弱吸收的区域, 因而调制器前表面反射的光束和 Al 膜反射的光束都存在随波长而变化的干涉现象. 但由于调制器前表面反射的干涉极大波长正好对应于 Al 膜反射的干涉极小波长, 因而在两者非相干迭加的情况下, 反射谱中干涉条纹被互相抵消了.

反射型调制器在不同反偏电压下的微分反射谱  $\Delta R/R$  如图 6 所示, 图中同时还给了此调制器在没有镀上 Al 膜以前的微分透射谱  $\Delta T/T$ . 可以看出, 与透射方式相比, 当调制器工作在反射方式时其调制幅度  $\Delta R/R$  有了极大的提高. 这是由于被调制的光束在多量子阱中经过了两次, 量子阱的有效厚度增加了一倍. 但在微分反射谱的第一个谷内( $460 \sim 467\text{nm}$ ) 调制幅度的绝对值不是增加了, 反而减加了. 我们认为这是由于来自调制器前表面的反射光与来自 Al 膜的反射光对外场有不同的响应所引起的. 在  $460 \sim 467\text{nm}$  区域经过多量子阱并由 Al 膜反射的光比较弱, 大部分的光均来自调制器前表面的反射. 虽然前表面的反射光对外场的响应  $\Delta R/R$  的绝对值比 Al 膜反射的  $\Delta T/T$  小, 却与后者有相反的符号<sup>[9]</sup>, 因而两者迭加的结果, 调制幅度反而比原来的  $\Delta T/T$  减小了. 但在微分反射谱的另外一个峰和谷中, 由 Al 膜反射的光或者与调制器前表面反射的光强度相当, 或者比前表面反射的光强很多, 因而总的  $\Delta R/R$  就提高了很多. 例如在  $-6 \sim 0\text{V}$  的调制电压下, 对于中间的峰而言, 调制幅度从  $4.89\%$  提高到了反射时的  $8.2\%$ , 对于右边的谷而言, 调制幅度则从  $3.4\%$  提高到了  $5.86\%$ , 分别增加了  $70\%$  左右. 这个实验结果已在表 1 中作了总结, 表 1 同时还给出了峰值波长随调制电压的红移.

另外, 我们发现通过加大调制电压的动态范围, 使用从正偏至反偏的调制电压, 也可增大调制幅度. 当文中所述的调制器在  $-6 \sim +2\text{V}$  的调制电压下, 其调制幅度  $\Delta T/T$  可从  $-6 \sim 0\text{V}$  反偏调制时的  $4.89\%$  提高到  $7.76\%$ ,  $\Delta R/R$  可从反偏调制时的  $8.20\%$  提高到  $13.51\%$ , 即调制电压增加了  $1/3$ , 而调制幅度可分别增加  $60\%$  和  $65\%$ . 这对调制器的实际应用具有较大的意义.

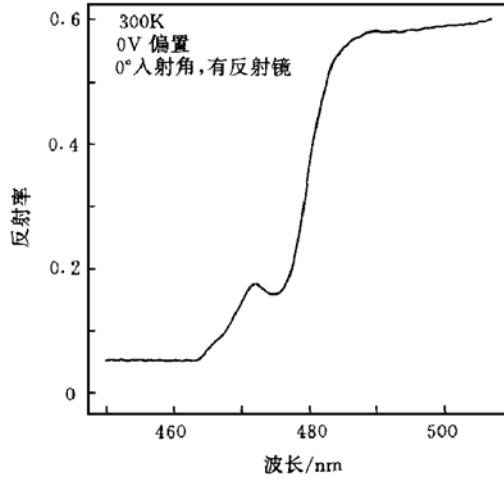


图5  $ZnCdSe/ZnSe$  多量子阱光调制器的反射谱

FIG. 5 Refraction spectrum of  $ZnCdSe/ZnSe$  MQW Photomodulator

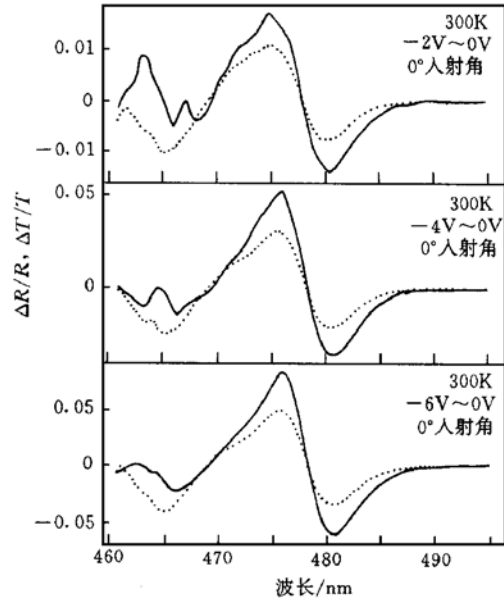


图6  $ZnCdSe/ZnSe$  多量子阱光调制器的微分反射谱及其微分透射谱(-6~0V 调制)

FIG. 6 Differential Transmission and Differential Reflection Spectrum of  $ZnCdSe/ZnSe$  MQW Photomodulator

表1  $ZnCdSe/ZnSe$  多量子阱光调制器峰值微分反射率和微分透射率的比较  
(P 和 N 分别表示正峰和负峰)

Table 1 Peak Differential Reflectance and Differential Transmittivity of  $ZnCdSe/ZnSe$  MQW Photomodulator

mod. Vol.	- 2~ 0V		- 4~ 0V		- 6~ 0V	
Peak/nm	P(474.7)	N(480.2)	P(475.4)	N(480.3)	P(475.7)	N(480.6)
$(\Delta T/T)/\%$	1.08	- 0.76	2.89	- 2.07	4.89	- 3.40
$(\Delta R/R)/\%$	1.68	- 1.35	5.02	- 3.53	8.20	- 5.86
$\frac{\Delta R/R - \Delta T/T}{\Delta T/T}$	0.56	0.78	0.74	0.71	0.68	0.72

## 4 结论

本文研究了室温时工作在蓝色波段的  $Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe$  多量子阱光调制器的制备及其光学特性. 利用量子限制的 Stark 效应制成了透射型和反射型  $Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe$  多量子阱光调制器. 在 - 8~ 0V 反偏电压的作用下, 透射型调制器的峰值调制幅度可达 17%, 而反射型调制器的峰值调制幅度可以比透射型提高 70% 以上.

与 III-V 族半导体的光调制器相比较, 宽带 II-VI 族光调制器可以工作在蓝色和蓝绿色的波长区域, 因

而对于此波段的光信号及光图象处理具有较大的应用价值.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] D. A. B. Miller *et al.*, Phys. Rev. B, 1985, **32**(2): 1043~ 1060.
- [ 2 ] S. Schmitt-Rink *et al.*, Adv. Phys., 1989, **38**(2): 89~ 188.
- [ 3 ] V. Pellegrini *et al.*, Phys. Rev. B, 1995, **51**(8): 5171~ 5175.
- [ 4 ] J. Valenta *et al.*, Solid State Commun. 1995, **98**(8): 695~ 700.
- [ 5 ] M. Fernandez *et al.*, Phys. Rev. B, 1997, **55**(12): 7660~ 7666.
- [ 6 ] Y. Kawakami *et al.*, Physica B, 1993, **185**: 496~ 499.
- [ 7 ] S. Y. Wang *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1993, **62**(15): 1715~ 1717.
- [ 8 ] G. D. Boyd *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1987, **50**(17): 1119~ 1121.
- [ 9 ] A. J. Shields and P. C. Klipstain, Phys. Rev., B, 1991, **43**(11): 9118~ 9125.