

一种利用光电流和光透过曲线测量电吸收调制器 插入损耗因素的方法*

廖裁宜[†] 赵玲娟 张云霄 边 静 潘教青 王 圩

(中国科学院半导体研究所,中国科学院半导体材料重点实验室,北京 100083)

(2008 年 7 月 16 日收到,2008 年 8 月 1 日收到修改稿)

提出一种新颖的方法用于测量电吸收调制器(electroabsorption modulator, EAM)各种因素造成的插入损耗. 此方法仅需要测量波长相关的光电流($I_{ph-\lambda}$)和光透过功率($P-\lambda$)的数据,通过最小二乘法拟合出结果. 理论分析表明此方法较精确,实验表明测试结果与理论拟合结果自洽得很好.

关键词:电吸收调制器,插入损耗,吸收曲线,光生电流

PACC: 4225B, 4280S, 4280L

1. 引 言

半导体电吸收调制器(EAM)是目前数字光通信和模拟光通信中的关键器件. 在实际应用中,插入损耗、消光比、调制效率是主要的性能参数,通过光通过率曲线,可以直接得到这些参数. 目前,EAM采用多量子阱(MQW)材料结构,量子限制斯塔克效应(QCSE)可增强调制效率和消光比,但器件无偏置电压时插入损耗较大,在 8—18 dB 之间^[1,2]. 引起插入损耗的因素较复杂,其中波导与光纤的耦合损耗占大部分,材料的残留吸收损耗也不可以忽略,此外波导的散射损耗也是重要因素. 仅从光通过率曲线得到整体插损是不够的,对每种因素造成的损耗的都一一确定,才能找到对应的减小 EAM 插入损耗的措施,例如光耦合损耗过大需要优化波导结构,残留吸收损耗过大需优化材料质量,散射损耗过大需优化工艺以提高波导质量等. 研究各种因素造成的损耗对 EAM 材料、波导结构的优化,都有着指导性的作用.

之前的研究中,多利用偏置电压相关的光电流($I-V$)和光透过功率($P-V$)关系进行推导;Wood 的方法^[3],需要假设波导的散射损耗 α_i 进而得到 α_{cv} ,结果依赖于猜测 α_i 的值;Chin 的方法^[4],假设波导散射损耗可忽略,只适用于波导制备良好的情况. Shim

的方法^[5],采用曲线拟合,拟合方程中存在 5 个未知数过于复杂,且曲线对测试数据并不敏感. 此外,以上方法均利用 $I-V$ 曲线,涉及到载流子收集效率 $\eta(V)$ 问题,使得推导不精确. 本文采用了在固定偏压下 $I_{ph-\lambda}$ 和 $P-\lambda$ 关系,避开了载流子收集效率问题,从而精确地获得各部分损耗,然后再通过 $I-V$ 和 $P-V$ 数据得到 $\eta(V)$, $\eta(V)$ 曲线可作为检验拟合结果是否合理的依据.

2. EAM 相关理论

EAM 工作的物理机理是基于材料的 Franz-Keldysh 或 QCSE 效应,在外加电场作用下,材料吸收边红移,对波长为 λ 的光的带间吸收系数由 $\alpha_0(\lambda)$ 增加为 $\alpha_{cv}(\lambda, V)$,记吸收系数的变化为 $\Delta\alpha = \alpha_{cv}(\lambda, V) - \alpha_0(\lambda)$. 则传输系数的变化 ΔT 为

$$\Delta T = T(V)T(0) = \exp(-\Gamma\Delta\alpha L). \quad (1)$$

这种带间吸收将会产生电子空穴对,在外电场的作用下,这些光生电子空穴对将被外电极收集形成光生电流,电子空穴对的收集效率记为 $\eta(V)$,在小的光电流下是与偏置电压相关的函数,大量产生的光生载流子在量子阱中将会屏蔽外加电场从而影响载流子的收集效率和光吸收系数. 因此,为了消除光生载流子的影响,以下的实验和分析中光电流均小于 0.1 mA. 除带间吸收之外,材料吸收还包括自

* 国家自然科学基金(批准号 90401025)和国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号 2006CB604901)资助的课题.

[†] E-mail: lzy1348@semi.ac.cn

由载流子吸收 $\alpha_{fc}^{[6]}$, 导带内吸收 $\alpha_{IVBA}^{[7]}$. 若假设波导是均匀的, 波导散射引起的损耗系数为 α_{sc} , 这些因素引起的光损耗不产生载流子且可以认为和偏压和入光波长无关, 统一记为 α_i ; 其中 $\alpha_{fc}, \alpha_{IVBA}$ 较 α_{sc} 小很多, $\alpha_i \approx \alpha_{sc}$.

3. 测试方法及理论推导

首先, 我们认为 α_i 和 α_{cv} 在 EAM 波导方向上是均匀的, 在光电流较小的情况下, 这种假设是可行的. 光的损耗和光电流产生为

$$dP = -(a_i + \Gamma\alpha_{cv})P(z)dz, \quad (2)$$

$$dI_{ph} = -(q/n_v)\eta\Gamma\alpha_{cv}P(z)dz, \quad (3)$$

dP 和 dI_{ph} 为在 $z-z+dz$ 之间光功率和光生电流的变化, Γ 为量子阱的光限制因子, η 为载流子的收集效率. (2)(3) 式的边界条件为

$$P(z=0^+) = P_{in}C_{in}, \quad (4)$$

$$P(z=L^-) \times C_{out} = P_{out}, \quad (5)$$

C_{in} 和 C_{out} 为 EAM 波导入光端和出光端的耦合效率, 并包括了反射损耗和光纤与波导的耦合效率; L 为 EAM 波导的长度. 将边界条件(4)(5)式代入(2), (3)式中得到

$$\begin{aligned} T(\lambda, V) &= P_{out}/P_{in} \\ &= C_{in}C_{out}\exp(-\alpha_i L - \Gamma\alpha_{cv}(\lambda, V)L) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} I_{ph}(\lambda, V) &= (qc/h\lambda)C_{in}\gamma(V)P_{in} \\ &\times \frac{\Gamma\alpha_{cv}(\lambda, V)}{\alpha_i + \Gamma\alpha_{cv}(\lambda, V)} \\ &\times [1 - \exp(-\alpha_i L - \Gamma\alpha_{cv}(\lambda, V)L)] \end{aligned} \quad (7)$$

其中, q 为电子电量, c 为光速, h 为普朗克常量. 当光电流较小, 偏压大于某一值 (V_{min}) 时, 载流子收集效率 $\gamma(V)$ 为定值 (接近于 1). 当保持一定电压 V_0 ($V_0 > V_{min}$) 时, 改变入射波长时由(7)式可得

$$\begin{aligned} f_{V_0}(\lambda_i) &= \frac{u}{u + \delta(\lambda_i)} \times \frac{v + \delta_{V_0}(\lambda_i)}{v} \\ &\times \frac{1 - e^{-u}}{1 - e^{-u} e^{-\delta_{V_0}(\lambda_i)}}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \delta_{V_0}(\lambda_i) &= \Gamma\alpha_{cv}(\lambda_i)L - \Gamma\alpha_{cv}(\lambda_0)L \\ &= \ln(T(\lambda_0, V_0)/T(\lambda_i, V_0)), \end{aligned} \quad (9)$$

$$f_{V_0}(\lambda_i) = \frac{\lambda_i}{\lambda_0} \times (I_{ph}(\lambda_i)/I_{ph}(\lambda_0)), \quad (10)$$

$$u = \alpha_i L + \Gamma\alpha_{cv}(\lambda_0)L, \quad (11)$$

$$v = \Gamma\alpha_{cv}(\lambda_0)L. \quad (12)$$

(8) 式是研究光吸收损耗最关键的等式, 选定参考波长 λ_0 后, 在一定偏压下通过改变可调谐激光器的波长得到一系列的 $[f_{V_0}(\lambda_i), \delta_{V_0}(\lambda_i)]$ 值, 参数 u, v 可以通过最小二乘法拟合得到, 进而得到 $\alpha_i L$, 以及在 V_0 偏压下不同波长的带间吸收损耗

$$\Gamma\alpha_{cv}(\lambda_i, V_0) = \Gamma\alpha_{cv}(\lambda_0, V_0) + \delta_{V_0}(\lambda_i). \quad (13)$$

然后研究带间吸收系数和偏压的关系 ($\alpha_{cv}-V$). 由(1)(13)式, 在固定工作波长 λ_1 下改变偏置电压, 带间吸收

$$\begin{aligned} \Gamma\alpha_{ac}(\lambda_1, V_i) &= \Gamma\alpha_{cv}(\lambda_0, V_0) + \delta_{\lambda_1}(V_i) + \delta_{V_0}(\lambda_1), \\ & \quad (14) \end{aligned}$$

其中 $\delta_{\lambda_1}(V_i) = \ln(T(\lambda_1, V_i)/T(\lambda_1, V_0))$ 可以直接测出 (14) 式代入(7)式可以计算出 $\gamma(V)$ 并验证结果是否合理.

4. 实验和数据拟合

采用上述方法用于具体实验中, 分析 EAM 的各部分损耗和测试材料吸收系数. 多量子阱材料包括 9 周期的张应变阱材料 (10 nm, -0.3%, 1.56 Q InGaAsP) 和 10 周期的压应变的垒材料 (8 nm 0.4%, 1.2 Q InGaAsP), 上下限制层分别为 100 nm 的 1.2 Q, 有源区被夹在 1.6 μm p-InP 上包层和 n-InP 下包层之间, 脊波导刻蚀到有源区之下, 脊波导的扫描电镜 (SEM) 如图 1 所示. 脊波导长度 $\sim 300 \mu\text{m}$, 宽度 $\sim 3 \mu\text{m}$, 高度 $\sim 2 \mu\text{m}$, 端面没有经过镀膜. 宽可调谐光源作为输入光信号, 并通过偏振控制器固定偏振态, 用透镜光纤 a 将光信号耦合入 EAM 脊波导入光端, 出光端通过透镜光纤 b 输入光功率计中. 为了减小 EAM 波导中光电流的饱和效应的影响, 测试中输入光功率设置在 500 μW . 以下实验控制和数据读取都采用自动测试完成, 时间很短, 可以认为耦合系数 C_{in} 和 C_{out} 保持不变. 实验步骤如下:

步骤 1 将 EAM 和光纤耦合到最佳状态后, 先固定偏置电压 V , 记录下不同输入波长情况下的光功率计接收的光功率 P 和光生电流 I_{ph} , 可得到 $\lambda-P$ 和 $\lambda-I$ 数据如图 2 所示. 然后将输入波长固定在工作波长附近 (1550 nm), 改变偏置电压记录下接收光功率 P 和光生电流 I_{ph} , 得到 $P-V$ 和 $I_{ph}-V$ 数据如图 3 所示.

步骤 2 由于 EAM 工作于 1550 nm 左右, 当输

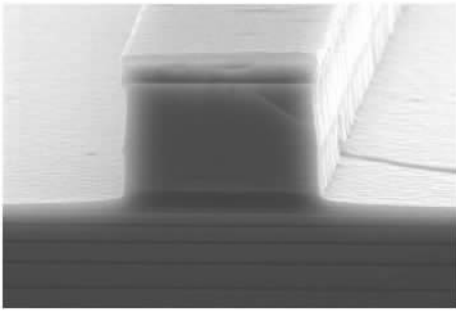


图 1 EAM 脊波导的 SEM 图

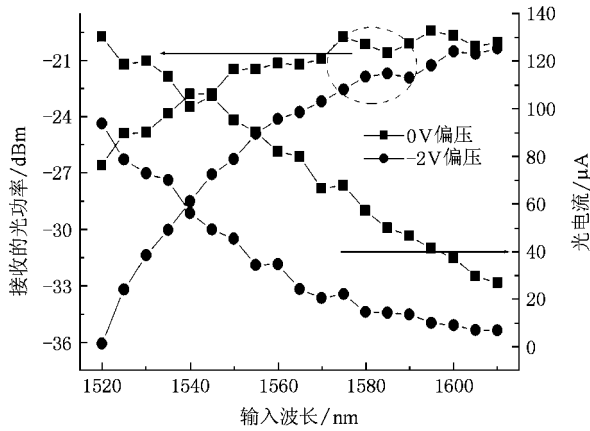


图 2 不同波长下透射光功率与光生电流曲线

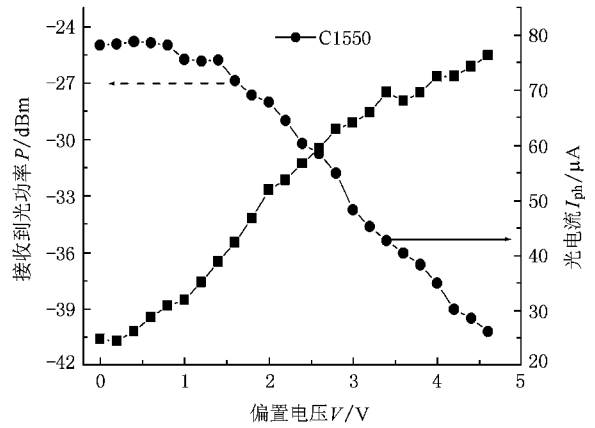


图 3 1550 nm 波长下透射光功率和光生电流与偏压的关系

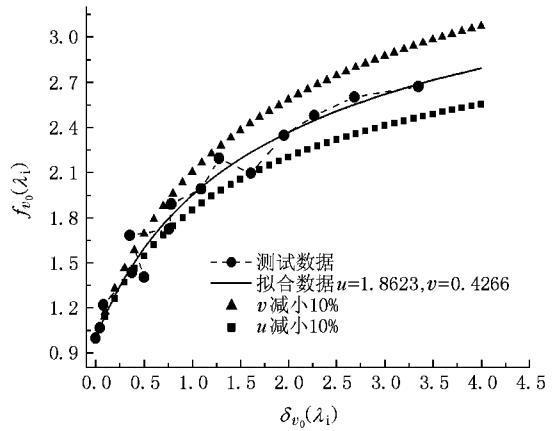


图 4 (8 式)拟合参数曲线

入波长远离工作波长 $\sim 50 \text{ nm}$ 时,带间吸收很小,由图 2 可以看出, 2 V 下输入 1605 nm 波长时光电流 $\sim 27 \text{ mA}$,可以认为此时带间吸收造成的损耗很小 (3 dB 以内),由 (13) 式可以估计各个波长带间吸收的范围,进而得到 u, v 参数的参考值 u_0, v_0 . 将偏压固定在 -2 V ,以保证载流子收集效率接近于 1 且保持一定的值不变,作为标准的波长 λ_0 设定为 1590 nm ,用步骤 1 测得的 $\lambda-P$ 和 $\lambda-I$ 数据通过 (9) 和 (10) 式可以得到一组 $[f_{2V}(\lambda_i), \delta_{2V}(\lambda_i)]_{1590 \text{ nm}}$ 数据如图 4 所示. 对此数据,通过 (8) 式,采用最小二乘法可以拟合出 u, v ,其中最小二乘法 u, v 赋初值为 u_0, v_0 . 拟合所得的曲线如图 3 所示,当拟合参数 u 或 v 变化 10% 时,由图 4 可见拟合曲线变化很大,远远偏离测试数据,由此可证明拟合曲线对拟合参数很敏感,数据拟合得到的参数是准确的.

得到拟合参数 u, v 后,通过 (11) (12) 式可以得到 EAM 波导在输入波长 1590 nm 偏压 -2 V 时的残余吸收损耗 $e^{-\Gamma_{\alpha_{cv}}(\lambda_0)L}$ 约为 1.86 dB ,散射损耗等

$e^{-\alpha_i L}$ 约 6.23 dB ,散射损耗对波长和偏压不敏感,而各个波长和偏压下的残余吸收损耗均可以由 (14) 式得到.

步骤 3 按上述方法,可得到 1550 nm 波长在 0 V 偏压下残余吸收损耗为 3.49 dB . 利用步骤 1 测试的 1550 nm 波长的 $P-V$ 和 $I-V$ 数据,可以得到偏压相关吸收系数,并由 (7) 式可以得到光耦合系数 $C_{in} \times \gamma(V)$. 由于光耦合系数 C_{in} 不变,由图 5 可以看出偏压大于 1.2 V 时, $\gamma(V)$ 基本保持不变,如果认为偏压较大时可以认为 $\gamma(V)$ 等于 1,从而可以得到耦合系数 $C_{in} = 0.185$. 从 $\gamma(V)$ 的曲线看,也证明了拟合参数 u, v 是正确的.

步骤 4 将光纤 b 作为输入端,而光纤 a 作为输出端,再次重复以上三个步骤,得到耦合系数 $C_{out} = 0.234$.

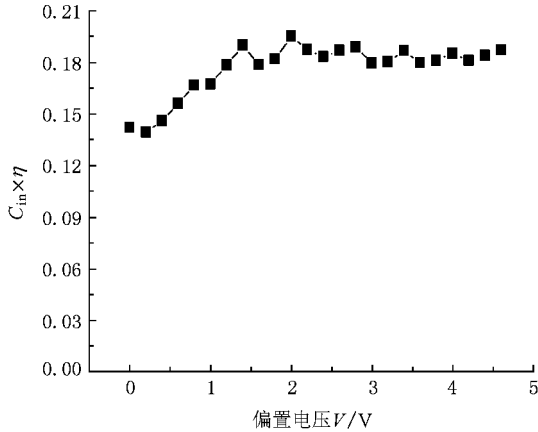


图 5 推导的不同偏压下光耦合效率 \times 载流子收集效率图

表 1 工作波长在 1550 nm 0 V 偏压时各部分损耗数据

1550 nm, 0 V	$\alpha_i L$	$\Gamma\alpha_{cv} L$	C_{in}	C_{out}	Sum	测试总插损
数值	1.435	0.804	0.185	0.234		
对应损耗/dB	6.2	3.5	7.3	6.3	23.3	22.0

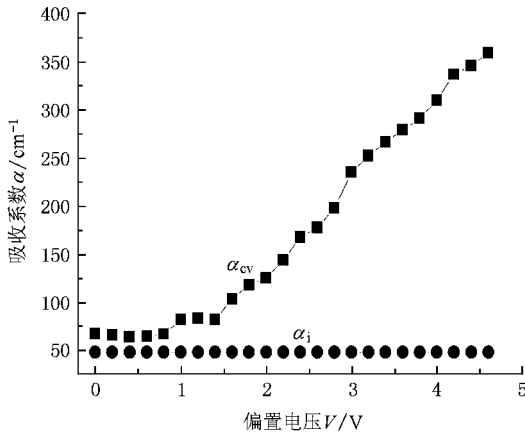


图 6 1550 nm 波长, 光限制因子 0.4, 吸收系数随偏压的变化曲线

5. 测试结果

由以上测试和数据处理得到工作波长在 1550 nm 0 偏置时各部分损耗的结果如表 1. 由表 1 可见, 经过计算出的各部分损耗的和为 23.3 dB 而直接测试的总插损为 22.0 dB, 计算值偏大. 其原因除了测试误差外, 是因为 C_{in} 和 C_{out} 是利用步骤 3 中的 $C_{in} \times \eta(V)$ 值, 假设 $\eta = 1$ 的情况下得到的, 实际情况 $\eta < 1$, 所以表 1 中的 C_{in} 和 C_{out} 要比实际偏小, 从而造成计算的总体损耗偏大. 此 EAM 插入损耗偏大, 除了耦合损耗较大外, 波导散射损耗较大, 达到 6.2 dB (如图 1 所示的 SEM 图中也可以看出波导界面很粗糙. 因此减小此 EAM 的插损, 一方面提高对准精

度减小耦合损耗, 另一方面在器件制备上, 采用端面镀膜还有 3 dB 的余地, 脊波导制作上减小散射有 6 dB 的余地.

同时, 利用(1)式可以得到工作波长下材料的吸收曲线如图 6. 吸收曲线对优化材料, 达到更大的消光比和调制效率有着很重要的指导作用.

6. 结 论

本文提出了一种利用波长相关的光透过功率和光电流数据, 通过最小二乘法拟合得到 EAM 带间吸收、波导散射、光耦合损耗造成的损耗, 给器件优化起到了指导作用. 实验结果表明, 理论拟合结果与实验结果较为符合, 该方法简单准确.

[1] Fukano H, Yamanaka T, Tamura M, Kondo Y 2006 *J. Lightwave Technol* **24** 2219
 [2] Yang H, Zhu H L, Pan J Q, Feng W, Xie H Y, Zhou F, An X, Bian J, Zhao L J, Chen W X, Wang W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2751 [in Chinese] [杨 华、朱洪亮、潘教青、冯 文、谢红云、周 帆、安 欣、边 静、赵玲娟、陈妮兮、王 圩 2007 物理学报 **56** 2751]
 [3] Wood T H 1986 *Appl. Phys. Lett.* **48** 1413

[4] Chin M K 1992 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **4** 866
 [5] Shim J, Liu B, Bowers J E 2004 *J. Quantum Electron* **40** 1622
 [6] Livescu G, Miller D A B, Chemla D S, Ramaswamy M, Chang T Y, Sauer N, Gossard A C, English J H 1988 *J. Quantum Electron QE-24* 1677
 [7] Asada M, Kameyama K, Suematsu Y 1988 *J. Quantum Electron QE-20* 745

A method to analyze insertion loss of electroabsorption-modulator using photocurrent and power transmission vs. wavelength^{*}

Liao Zai-Yi[†] Zhao Ling-Juan Zhang Yun-Xiao, Bian Jing, Pan Jiao-Qing, Wang Wei

(Key Laboratory of Semiconductors Materials, CAS, Beijing 100083, China)

(Received 16 July 2008 ; revised manuscript received 1 August 2008)

Abstract

A novel method to ascertain diversified factors contributing to total insertion loss in an electroabsorption modulator is presented. Only the measurement of photocurrent and power transmission vs. wavelength is needed. It's an accurate method, as shown by both theory analysis and experimental results.

Keywords : electroabsorption modulator, insertion loss, absorbed curve, photocurrent

PACC : 4225B, 4280S, 4280L

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 90401025) and the National 973 Program of China (Grant No. 2006CB604901).

[†] E-mail : lzy1348@semi.ac.cn