

超低压选择区域生长法制备产生 10 GHz 重复率超短光脉冲的级联电吸收调制器与分布反馈激光器 单片集成光源*

赵 谦^{1)†} 潘教青¹⁾ 张 靖¹⁾ 周光涛²⁾ 伍 剑²⁾ 周 帆¹⁾ 王宝军¹⁾ 王鲁峰¹⁾ 王 圩¹⁾

1) 中国科学院半导体研究所国家光电子工艺中心, 北京 100083)

2) 北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

(2005 年 5 月 17 日收到, 2005 年 6 月 13 日收到修改稿)

采用超低压 (22×10^2 Pa) 选择区域生长 (selective area growth, SAG) 金属有机化学气相沉积 (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD) 技术成功制备了 InGaAsP/InGaAsP 级联电吸收调制器 (electroabsorption modulator, EAM) 与分布反馈激光器 (distributed feedback laser, DFB) 单片集成光源的新型光电器件. 实验结果表明, 采用该技术制备的器件具有良好的性能. 激光阈值为 19 mA, 出光功率为 4.5 mW, 在 5 V 的驱动电压下达到了 20 dB 的消光比, 器件 3 dB 响应带宽达到了 10 GHz 以上. 应用这种新型器件, 利用级联 EAM 的光开关效应, 获得了重复率为 10 GHz, 半高宽 (full-width-at-half-maximum, FWHM) 为 13.7 ps 的超短光脉冲.

关键词: 超低压, 选择区域生长, 集成光电子器件, 超短光脉冲

PACC: 4282, 7280E, 8115H

1. 引 言

为了满足日益增长的信息传输的需要, 发展超高速、大容量的光纤通信已成为国际光通信领域的主要方向. 光时分复用 (optical time division multiplexing, OTDM) 技术采用超短光脉冲在时间上进行间插, 每一个时间间隙携带一个数据信道的信息, 从而实现多路复用, 增加传输容量. OTDM 技术作为实现超高速通信、克服电子器件传输速率瓶颈的有效方法, 越来越引起研究人员的关注. 高重复率超短光脉冲源是 OTDM 系统的核心部件. OTDM 系统要求脉冲源具有高速同步性、速率可调性和稳定性. 目前, 用于 OTDM 系统的脉冲源主要有增益开关半导体激光器、半导体锁模激光器、锁模光纤激光器^[1-3]. 但是这些方法都存在着啁啾大、时间抖动大、稳定性和可谐调性差等缺陷. 近年来, 基于多量子阱 (multiple quantum well, MQW) EAM 的非线性吸

收特性产生超短光脉冲的新方法得到了广泛的关注^[4]. 该方法具有脉冲重复率高、脉冲啁啾小、体积小、集成度高、脉冲稳定、可靠的优点, 具有广阔的实用化前景. 人们从理论^[5]和实验^[6]上都对此进行了大量研究.

近年来, 能带控制工程取得了显著进展^[7]. 其中, 选择区域生长法 (SAG) 备受关注. SAG 方法是在平面衬底的特定区域制作介质膜, MOCVD 外延生长时介质膜附近生长速率加快, 通过改变介质膜尺寸, 生长材料的带隙可以被局部地控制, 从而在一次外延生长中就能获得不同带隙的材料. SAG 技术具有工艺简单、外延次数少、能获得较高的波导耦合效率等优点, 对于制作集成光电子器件而言是一种十分实用的技术.

本文讨论了超低压 (22×10^2 Pa) SAG MOCVD 技术的生长原理, 优化了生长条件, 并利用该技术成功制备了 InGaAsP/InGaAsP 级联 EAM 与 DFB 单片集成的新型光源, 获得了优良的器件性能. 激光阈值为

* 国家重点基础研究发展计划 (973 项目) (批准号: G2000068301)、国家高技术研究发展计划 (批准号: 2002AA312150) 和国家自然科学基金 (批准号: 90101023, 60176023, 60476009) 资助的课题.

† E-mail: qzhao@red.semi.ac.cn

19 mA, 出光功率为 4.5 mW, 在 5 V 的驱动电压下达到了 20 dB 的消光比, 器件 3dB 响应带宽达到了 10 GHz 以上. 本文还分析了基于级联 EAM 的双开关效应产生超短光脉冲的原理. 应用这种新型集成器件, 在未经脉冲压缩技术处理的情况下, 我们获得了 10 GHz 重复率、脉冲宽度为 13.7 ps 的超短光脉冲.

2. 实验过程

本文采用超低压 (22×10^2 Pa) SAG MOCVD 技术制备 InGaAsP/InGaAsP 级联 EAM 与 DFB 单片集成器件. MOCVD 设备为 AIXTRON-200 型, 采用三甲基铟 (TMIn), 三乙基镓 (TEGa) 作为 III 族源, 砷烷 (AsH_3) 和磷烷 (PH_3) 作为 V 族源, 衬底为掺硫的 $(100)_n$ -InP. 在外延生长过程中, 衬底温度为 $655^\circ C$, V/III 为 250, 沉积气压为 22×10^2 Pa, 而仍然保持较快的平面区生长速度为 $1.8 \mu m/h$.

介质膜掩蔽图形制作过程如下: 首先在衬底上采用等离子体增强化学气相沉积法 (PECVD) 沉积厚约 200 nm 的 SiO_2 , 接着沿 [011] 晶向刻蚀出掩蔽图形. 为了保证选择区域内的 MQWs 材料的均匀性, 采用了带尖端的掩蔽图形, 如图 1 所示. 掩蔽图形的 SiO_2 宽度 (W_m) 从 $15 \mu m$ 变化到 $30 \mu m$, 长度为 $600 \mu m$, 掩蔽图形之间的选择生长区宽度 (W_g) 为 $15 \mu m$, 尖端区的长度为 $50 \mu m$.

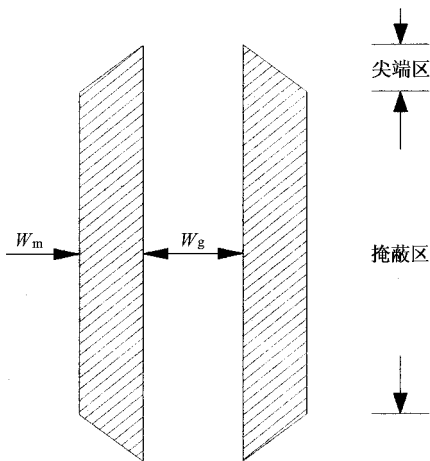


图 1 选择生长 InGaAsP/InGaAsP MQWs 材料时使用的掩蔽图形结构示意图

本文采用微区光荧光 (μ -PL) 对材料质量进行表征. 激励光源为 514.5 nm 的 Ar 离子激光器, 激励光斑直径约为 $4 \mu m$. 整个测试过程在室温下进行.

3. 结果与讨论

图 2 为 SAG 的生长原理示意图. 与平面 MOCVD 生长类似, 在 SAG 生长过程中, 反应气体在样品表面形成滞留层. 反应物粒子主要有三种运动方式: 通过滞留层的纵向气相扩散、在滞留层内的横向气相扩散和衬底表面的迁移. 反应物粒子纵向扩散穿过滞留层, 到达衬底表面. 在 SAG 中, 由于介质膜上反应物粒子不能成核, 因此导致介质膜区域的反应物粒子浓度比其周围区域要高, 这样在横向形成了一个浓度梯度, 介质膜上的反应物粒子一方面要重新扩散卸载气, 另一方面将产生横向扩散, 使得邻近的选择生长区的材料生长速率加快, 因此选择生长区内的材料要厚于平面区. 另外, 反应物在衬底表面的迁移也将影响到材料的生长形貌. 当使用 SAG 方法生长 MQWs 材料时, 在选择生长区的量子阱厚度较大, 具有长的带隙波长, 而平面区域的量子阱厚度较小, 具有短的带隙波长. 通过局部地控制掩膜的宽度, 可以改变选择生长区域的厚度增强因子, 从而实现在同一衬底上局部地控制量子阱的带隙波长, 制备集成光学器件需要的材料. 由于反应物粒子在衬底表面的迁移距离很小 ($1-2 \mu m$), 因此对于宽选择区 ($W_g > 5 \mu m$) SAG 生长而言, III 族源的气相横向扩散是主要因素^[8]. 众所周知, 低沉积气压有助于获得均匀的材料质量和陡峭的异质材料界面, 但较低的沉积气压往往又导致缓慢的生长速率. 本文采用超低压沉积 (22×10^2 Pa), 同时又保持了较快的生长速率, 有效地克服了这个矛盾. 这是目前文献报道中采用的最低的选择生长沉积气压.

由上述可知, 掩蔽图形尺寸是影响 SAG 生长的重要因素. 图 3(a) (b) 给出了 PL 波长、PL 谱强度和 FWHM 与不同掩蔽图形宽度的依存关系. PL 波长从 1480 nm (平面区) 红移至 1568 nm ($W_m = 30 \mu m$), 覆盖了 88 nm 的波长窗口, 这样大的波长偏调量完全满足制作 EAM/DFB 集成器件的需要. 从图中可以看出, 随着掩蔽图形宽度的增加, 波长几乎呈线性增加, 可知掩蔽图形宽度对生长材料的波长带隙有着重大影响. 图 3(b) 所示为图 3(a) 中对应的归一化 PL 强度及 PL 谱 FWHM. 可以看到, 选择生长区域的 PL 强度和 FWHM 几乎与平面区的相当, 说明采用超低压 SAG MOCVD 技术生长 MQWs 材料同样能获得良好的发光效率和结晶质量.

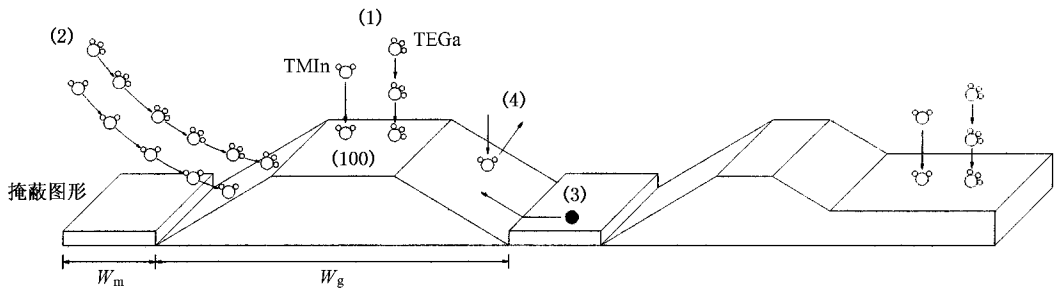


图 2 选择区域生长原理示意图

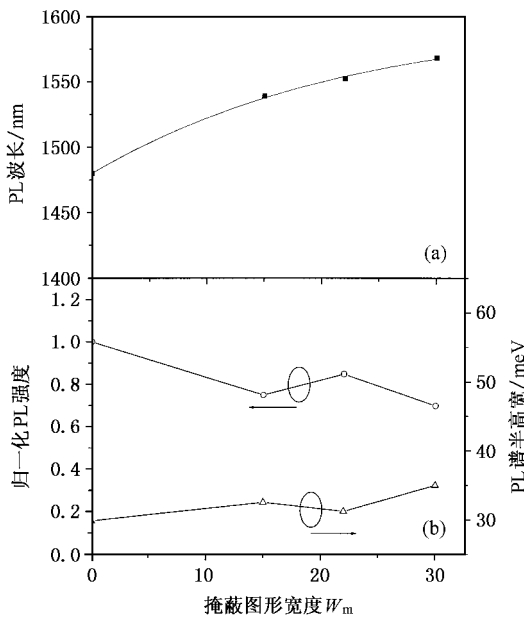


图 3 (a) PL 波长与掩蔽图形宽度的依存关系。(b) 为 (a) 中对应的 PL 强度与 FWHM

利用上述超低压 SAG 技术生长的 MQWs 材料，

我们制作了 InGaAsP/InGaAsP 级联 EAM/DFB 单片集成光源,其中 EAM 与 DFB 能带带隙差为 60 nm,选择生长区为 DFB 激光器,而平面生长区为 EAM. 器件结构采用深脊条形,在文献 [9] 中报道了器件的详细制作过程.图 4 给出了级联 EAM/DFB 单片集成光源的结构示意图.其中,DFB 长 300 μm ,EAM 长 150 μm .从图 4 的插图中可以看到,在选择生长区与平面生长区之间是 MQWs 厚度缓变的过渡区域.

图 5 是典型的级联 EAM/DFB 单片集成器件的输出光强-电流曲线.器件的阈值电流为 19 mA,输出光功率为 4.5 mW.插图中是该器件的在 80 mA 注入电流下的光谱图,可以看到,边模抑制比(side mode suppression ratio, SMSR)大于 40 dB.这也说明采用超低压 SAG 技术能获得良好的材料质量和较高的耦合效率.为进一步分析器件的性能,我们还测试了 EAM 的消光比(extinction ratio, ER),如图 6 所示.

测试过程中,将 EAM 端的出射光耦合入单模光纤(single mode fiber, SMF),偏压从 0 V 变化到 5 V,DFB 激光器端的注入电流为 80 mA.从图中可以看到,在 5 V 偏压时获得了超过 20 dB 的消光比.这样

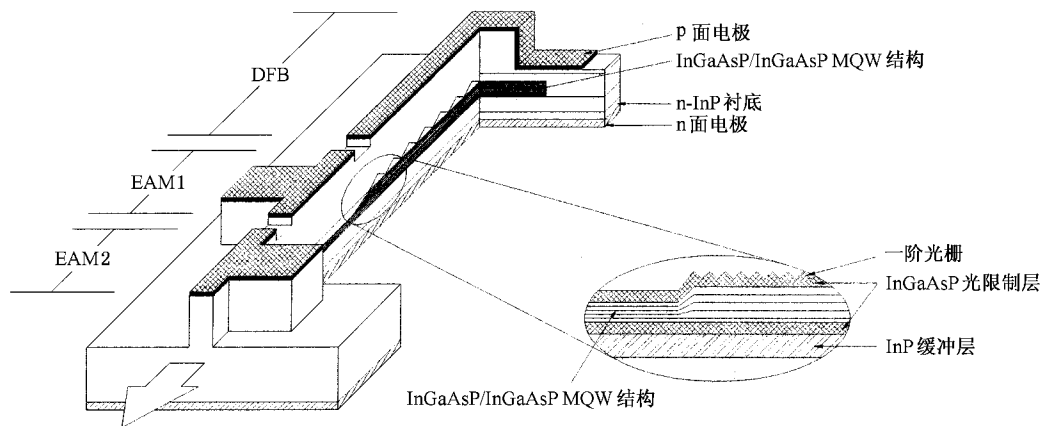


图 4 级联 EAM/DFB 单片集成光源的器件结构示意图(插图显示了选择生长区与平面生长区之间的 MQWs 厚度缓变的过渡区域)

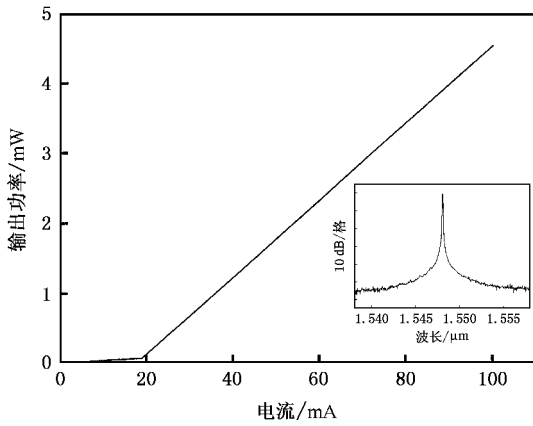


图 5 采用超低压 SAG 技术生长的 MQWs 制作的级联 EAM/DFB 单片集成光源的光强-电流曲线(插图为 DFB 端注入电流为 80 mA 时的光谱图 边模抑制比大于 40 dB)

出器件的 3 dB 带宽大于 10 GHz,这样宽的频率响应带宽有利于产生高重复率的超短光脉冲.

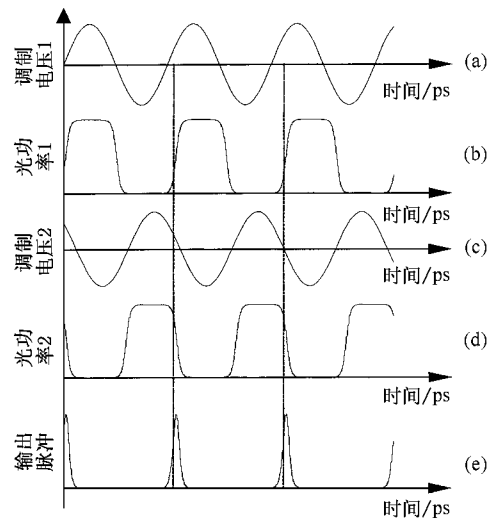


图 8 级联 EAM 产生超短光脉冲的原理示意图 (a)外加的调制电压(EAM1)(b)EAM1 的输出光(EAM1 的光开关作用)(c)外加的调制电压(EAM2)(d)EAM2 的输出光(EAM2 的光开关作用)(e)最终输出的超短光脉冲^[10]

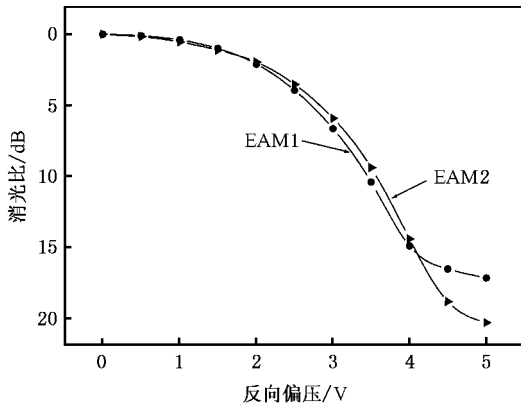


图 6 不同偏压下 EAM 的消光比特性

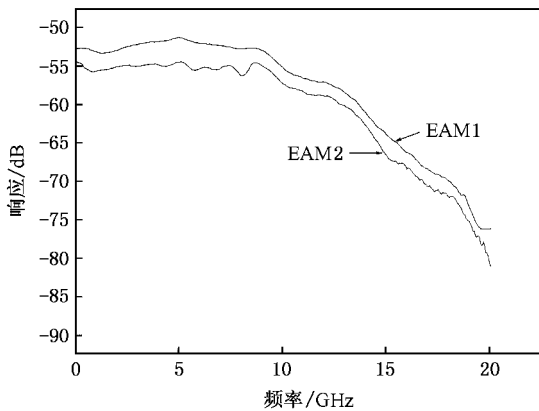


图 7 集成器件 EAM 部分的频率响应曲线

大的消光比有利于产生较窄的短脉冲.为了了解器件的响应带宽,我们还进一步测量了器件在 2 V 反向偏压下的小信号响应,如图 7 所示.从图中可以看

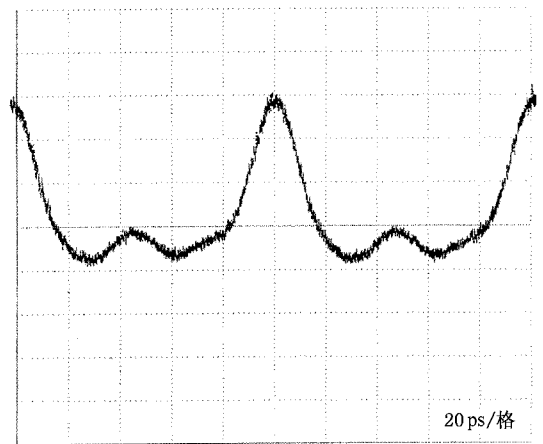


图 9 测量得到的脉冲波形图(脉冲重复率为 10 GHz,正弦驱动信号的功率为 24 dBm)

级联 EAM 产生超短光脉冲的原理如图 8 所示^[10].级联 EAM 的产生超短光脉冲实际上等效于直流光在两个光开关作用下的连续调制过程.图 8 (a)表示作用到第一级 EAM 上的调制电压 (b)为与其对应的第一级 EAM 产生的透过窗口;同理 (c)表示作用到第二级 EAM 上的调制电压 (d)为与其对应的第二级 EAM 产生的透过窗口,由于 (a)和 (c)之间存在一定的相位差,从而导致其透过窗口 (b)和 (d)之间也存在时间上的前后关系,只有完全处于两

个窗口重叠区域的光才能透过 EAM ,如(e)所示 ,因此可以产生更窄的光脉冲。

我们应用这种集成器件进行了产生超短光脉冲的实验。器件采用 10 GHz 重复率、功率为 24 dBm 的正弦电信号驱动 ,外加反向偏压为 5 V ,并通过调节相位延迟装置使两个 EAM 之间的正弦驱动信号出现一定的相位延时。输出的脉冲信号耦合进 SMF ,并经过掺铒光纤放大器(erbium-doped fibre amplifier , EDFA)放大后输入数字取样示波器(Tektronix 11801C)读取脉冲宽度。测量的脉冲未经任何脉冲压缩技术处理。脉冲波形如图 9 所示。

从图中可以看到 ,测量得到的脉冲宽度(ΔT_m)为 17 ps。考虑到取样示波器探测系统具有高斯频响特性 ,且响应速度(ΔT_s)为 10 ps ,因此由公式 $\Delta T^2 =$

$\Delta T_m^2 - \Delta T_s^2$ 可以得到真实的脉冲宽度为 13.7 ps ,由此也可得到脉冲的占空比为 13.7%。

4. 结 论

本文分析了 SAG 生长原理 ,并采用超低压(22×10^2 Pa)SAG MOCVD 技术成功制备了波长偏调量达 88 nm 的高质量 MQWs ,并制作了新型的级联 EAM/DFB 单片集成光源 ,显示出了优良的器件性能。激射阈值为 19 mA ,出光功率为 4.5 mW ,在 5 V 的驱动电压下达到了 20 dB 的消光比 ,器件 3 dB 带宽达到了 10 GHz 以上。应用这种新型器件 ,我们得到了未经脉冲压缩技术处理的重复率为 10 GHz ,FWHM 为 13.7 ps 的超短光脉冲。

- [1] Hansen P B , Raybon G , Koren U , Iannone P P , Miller B I , Young M G , Newkirk M A , Burrus C A 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 1445
- [2] Gunning P , Lucek J K , Moodie D G , Smith K , Davey R P 1996 *Electron Lett.* **32** 1010
- [3] Nakazawa M , Yoshida E , Tamura K 1996 *Electron Lett.* **32** 1285
- [4] Oshiba S , Nakamura K , Horikawa H 1998 *IEEE J. Quantum Electron* **34** 277
- [5] Kuznetsov M 2001 *OFC* paper WDD-1
- [6] Wakita K , Yoshino K , Hirano A , Kondo S , Noguchi Y 1998 *IEICE*

Trans. Electron. **E81C** 175

- [7] Zhao Q , Wang B , Yan H , Kumeda M , Shimizu T 2004 *Acta. Phys. Sin.* **53** 151 (in Chinese) 赵 谦、王 波、严 辉、久米田稔、清水立生 2004 *物理学报* **53** 151]
- [8] Kayser O 1999 *J. Cryst. Growth* **107** 989
- [9] Zhao Q , Pan J Q , Zhou F , Wang B J , Wang L F , Wang W 2005 *Semicond. Sci. Technol.* **20** 544
- [10] Zhang F , Wu J , Lin J T 2000 *Acta. Phot. Sini.* **29** 616 (in Chinese) 张 帆、伍 剑、林金桐 2000 *光子学报* **29** 616]

10 GHz optical short pulse generation using tandem electroabsorption modulators monolithically integrated with distributed feedback laser by ultra-low-pressure selective area growth^{*}

Zhao Qian^{1)†} Pan Jiao-Qing¹⁾ Zhang Jing¹⁾ Zhou Guang-Tao²⁾ Wu Jian²⁾ Zhou Fan¹⁾
Wang Bao-Jun¹⁾ Wang Lu-Feng¹⁾ Wang Wei¹⁾

1) (National Research Center of Optoelectronics Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

2) (Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(Received 17 May 2005; revised manuscript received 13 June 2005)

Abstract

In this work, a novel light source of tandem InGaAsP/InGaAsP multiple quantum well electroabsorption modulator (EAM) monolithically integrated with distributed feedback laser is fabricated by ultra-low-pressure (22×10^2 Pa) selective area growth metal-organic chemical vapor deposition technique. Superior device performances have been obtained, such as low threshold current of 19 mA, output light power of 4.5 mW, and over 20 dB extinction ratio at 5 V applied voltage when coupled into a single mode fiber. Over 10 GHz 3dB bandwidth in EAM part is developed with a driving voltage of 2 V. Using this sinusoidal voltage driven integrated device, 10GHz repetition rate pulse with an actual width of 13.7 ps without any compression elements is obtained due to the gate operation effect of tandem EAMs.

Keywords : ultra-low-pressure, selective area growth, integrated optoelectronics, ultra short optical pulse

PACC : 4282, 7280E, 8115H

^{*} Project supported by the National "973" (Grant No. G2000068301) the National "863" (Grant No. 2002AA312150), and the National Natural Sciences Foundation of China (Grant Nos. 90101023, 60176023, 60476009).

[†] E-mail : qzhao@red.semi.ac.cn