

分类号: TN256

单位代码: 10335

学 号: 11130021

浙江大学

博士学位论文



中文论文题目: 硅基光调制器的研究

英文论文题目: Optical Modulator

Based on Silicon-on-Insulator Platform

申请人姓名: 黄强盛

指导教师: 何赛灵

专业名称: 光通信技术

研究方向: 光通信技术

所在学院: 光电科学与工程学院

论文提交日期 2016 年 4 月 8 日

硅基光调制器的研究



论文作者签名: 签字

指导教师签名: 签字

论文评阅人 1: 丘处机 真人 登州滨都宫

评阅人 2: 葛 洪 方士 罗浮山道观

评阅人 3: 寇谦之 天师 嵩山中岳道场

评阅人 4: 张三丰 真君 武当玉虚宫

评阅人 5: 孙玄清 真人 崂山明霞洞

答辩委员会主席: 唐三藏 功佛 洛阳大慈恩寺

委员 1: 惠 能 方丈 曹溪宝林寺

委员 2: 智 顓 方丈 天台山国清寺

委员 3: 法 藏 大和尚 洛阳佛授记寺

委员 4: 道 济 和尚 临安灵隐寺

委员 5: 降 龙 尊者 天竺大雷音寺

答辩日期: 2016 年 6 月 12 日

HVlab L^AT_EX Fast Guide

The Second Edition



Author's signature: _____

Supervisor's signature: _____

External Reviewers:	Name	Professional Title	Organization
	Name	Professional Title	Organization
	Name	Professional Title	Organization
	Name	Professional Title	Organization
	Name	Professional Title	Organization

Examining Committee Chairperson:

Name	Professional Title	Organization
------	--------------------	--------------


Examining Committee Members:

Name	Professional Title	Organization
Name	Professional Title	Organization
Name	Professional Title	Organization
Name	Professional Title	Organization
Name	Professional Title	Organization

Date of oral defence: June 12th, 2016

浙江大学研究生学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得浙江大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。


学位论文作者签名：


签字日期： 2015 年 6 月 30 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解浙江大学有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权浙江大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期： 2015 年 6 月 30 日

签字日期： 2015 年 6 月 30 日

致谢

在我写这个文档的过程中，得到了网络上很多网站的帮助，在此感谢 baidu, Google, 感谢 CTeX 社区 <http://www.ctex.org>, L^AT_EX 学习园地: <http://blog.sina.com.cn/wangzhaoli11>, 中科大 CTAN 镜像 <http://mirrors.ustc.edu.cn/CTAN/>, 小木社区 T_EX 版等网站、论坛，其他一些较小的个人网站，论坛不再一一命名，在此一并感谢。感谢浙江大学数学系提供的原始模版，感谢 88T_EX 版。

摘要

硅基平台，即由硅衬底、二氧化硅绝缘层和硅薄膜构成的平台，不仅在传统半导体电子领域中有广泛运用，在微纳光子系统中也被广泛采用。硅基平台成为了实现微纳光电子集成芯片的理想平台。光电子集成芯片中的光通信模块，将提高芯片间的通信速度，降低通信功耗。硅基光通信模块也给传统的半导体设计和制作带来新的挑战。因此，硅基光通信模块有着巨大的研究和实用价值。光调制器做为光通信模块中不可缺少的一环，一直是该领域关注的重点。本论文的研究包含了硅基平台光调制器的两种新型方案。

第一个方案，采用混合集成技术，将直接带隙的 III-V 多量子阱材料直接键合到硅基光波导上面，利用 III-V 多量子阱材料的电吸收效应实现高速光调制器。在这种硅基混合平台上，本文设计了目前最短的双层锥形的耦合结构，实现光在纯硅波导和混合集成 III-V 波导之间的低损耗的耦合。该耦合结构长度只有 $8\ \mu\text{m}$ ，就能实现 95% 以上能量的耦合，同时拥有 $100\ \text{nm}$ 的工作带宽。凭借这种双层锥形结构，本文制作和测试了硅基混合集成的 III-V 电吸收调制器。利用 III-V 材料高选择性腐蚀比的特性，我们简化了传统混合集成 III-V 波导的制作流程。并且，我们在世界上首次展示了基于能带填充效应的低驱动电压电吸收调制器。该调制器的长度有 $80\ \mu\text{m}$ ，驱动电压值只有 $50\ \text{mV}$ ，动态消光达到 $6.3\ \text{dB}$ ，与此同时调制速率有 $1.25\ \text{Gbps}$ 。这是目前世界上驱动电压最低的光调制器之一。基于能带填充效应的电吸收调制器提供了一种实现低驱动电压，低功耗，小尺寸调制器的新思路。

借助于电吸收调制器在反偏电时既是调制器也是探测器的双工作状态的特点，我们首次展示了集成两个级联的整列波导光栅，6 个高速调制器，6 个高速探测器的单片硅基混合集成的光收发模块。信道的频率间隔是 $200\ \text{GHz}$ ，单个信道的收发传输速率达到 $30\ \text{Gbps}$ 。最终在 $1.5 \times 0.25\ \text{mm}^2$ 的硅基芯片，利用混合集成技术上实现了 $180\ \text{Gbps}$ 的光收发模块。除此之外，我们分析比较了同个电吸收调制器在行波电极和集总电极两种工作模式下的区别。行波电极具有高速的特点，然而需要更大的驱动电压，消耗更多的功率。

第二个方案，利用硅的等离子色散效应引起的相位变化，我们设计了新型的基于可调反射镜和微环结构的光调制器。这种可调反射微环的光调制器，既有马赫-曾德尔光调制器大工作带宽的特点，也有微环调制器结构紧凑的特点。该调制器相位调制区域只有 $20\ \mu\text{m}$ ，

驱动电压只需要 2 V，调制带宽将达到 40GHz。

关键词： 集成光路 硅基调制器 硅基混合集成平台 电吸收调制器 光探测器 光收发模块

Abstract

The quick brown fox jump over the lazy dog.

T_EX

Keywords: T_EX

目录

致谢	I
摘要	III
Abstract	V
目录	
1 绪论	1
1.1 硅基光电子集成技术的发展与现状	1
1.2 硅基光调制器	4
1.2.1 硅基光调制器的指标	4
1.2.2 硅基光调制器的种类	4
1.3 论文的内容和创新点	4
1.3.1 论文内容	4
1.3.2 论文创新点	4
2 光器件的基本仿真方法	5
2.1 波导的仿真	5
2.2 器件的仿真	5
2.3 系统的仿真	5
2.4 多量子阱结构的仿真设计	5
2.5 高速电极的仿真	5
3 低驱动电压硅基电吸收调制器	7
3.1 低驱动电压光调制器概述	7
3.2 混合集成调制器的设计	7
3.3 混合集成调制器的制作	7
3.4 性能测试	7
3.5 电吸收调制器的双工作模式	7
3.6 硅基单片集成的光收发模块	7

4 硅基反射微环的光调制器	9
4.1 反射环概述	9
4.1.1 可调反射率微环	9
4.1.2 光栅反射微环	9
4.2 可调反射率微环调制器的设计	9
4.3 光栅反射微环调制器的设计	9
4.3.1 光栅反射环的设计	9
4.3.2 光栅反射环的制作	9
4.3.3 无源性能测试	9
5 高速光调制器电极的设计	11
5.1 高速光调制器概述	11
5.2 电极设计	11
5.3 电吸收调制器不同电极的比较	11
6 总结与展望	13
参考文献	15
索引	17
作者简介	19
发表文章目录	21

1 绪论

自从进入 21 世纪，互联网已经不仅成为人类不可分割的一部分，也成为越来越多设备不可缺少的功能。人类和设备对上网带宽的需求越来越大，这促进了信息技术领域的高速发展。为了满足人类和设备日益增长的需求，光通信已经从主干网逐渐渗入到了房内。而在不远的将未来，光通信将迈向最后一步进入到处理器内部。而这对光通信的器件设备提出了新的要求。

传统光器件，虽然性能满足要求，但是由于其价格高，尺寸大，功耗大将无法满足大规模的应用。因此，研究人员从各方面不断尝试新的材料，新的结构探索高速，小尺寸，低功耗，价格低廉的解决方案。目前这个研究领域依旧热火朝天的进行着。

本章首先将介绍最有希望帮助光通信迈向最后一步的硅基光电子集成技术，接着着重讨论硅基光电子器件中的硅基光调制器，介绍其目前国内外的发展现状，最后将介绍在光调制器领域内由本作者首次完成的工作。

1.1 硅基光电子集成技术的发展与现状

随着信息技术的发展，短距离通信的速率不断提高。当数据的通信速率达到 10 Gbps 时，利用金属的电互联技术将会遇到能耗，串扰，损耗和电磁干扰等问题。尤其，面对当前云计算服务器间和多核处理器内，数据的交互需要在有限的空间内同时满足大带宽、低能耗和低成本的困境时，电互联的瓶颈凸显出来。电互联的这些缺点，可以通过光通信技术来解决。然而传统光通信由于单个光器件的成本高，集成度低，阻碍了传统光通信技术在短距离通信中的应用。

(该段待续) 硅基平台，即由硅衬底、二氧化硅绝缘层和硅薄膜构成的平台，不仅在传统半导体电子领域中有广泛运用，在微纳光子系统中也被广泛采用。硅基平台也成为了实现光电子集成芯片的理想平台。虽然，过去基于 III-V 材料的 InP 平台光电子平台已经实现了复杂的通信系统，但是大规模应用需要价格低廉，并且芯片间通信需要尺寸小，满足 CMOS 工艺。硅基光波导具有成本低，损耗低，折射率差大，结构小，的特别点。因此，硅基光电

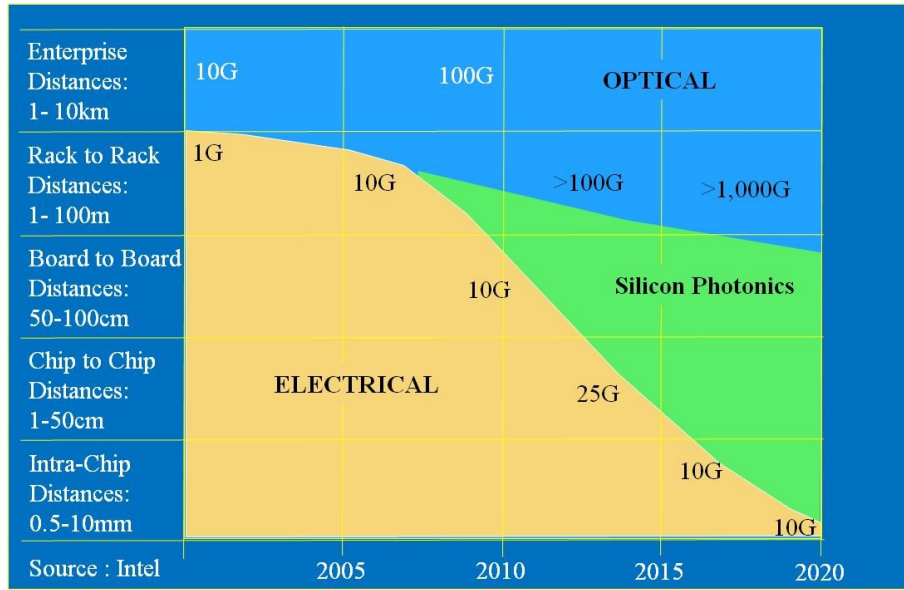


图 1-1 在不同通信距离下，电互联、硅基光通信和光纤通信的速率使用范围^[1]

子平台越来越在光通信领域受到人们的关注。

硅基光通信模块作为硅基光电子集成芯片的一个重要应用方向，其具有带宽大，功耗低，成本低的特点。图 1-1 描述了电互联、硅基光通信和传统光纤通信和在不同距离下的适用速率范围^[1]。图 1-1 也预测了随着通信速率的逐年不断提高，硅基光通信在短距离将逐渐代替电互联。因此，硅基光集成芯片越来越收到各国的关注。美国在 2004 年率先提出了 EPIC (Electronic and Photonic Integrated Circuits on Si) 计划，研究硅基光电子集成平台，这将有助于通信，传感，微波光子学等研究方向的发展^[2]。欧洲在 2008 年提出了 HELIOS (pHotonics ELectionics functional Integration on CMOS) 计划，研究基于 CMOS 工艺的硅基光电子平台^[3]。日本也紧跟而上，在 2010 年提出了 PECST(Photonics and Electronics Convergence System Technology), 推动硅基光电子平台的发展，实现芯片间的通信带宽密度达到 10 Tb/s/cm²^[4]。

光集成芯片的概念最早是由美国贝尔实验室的 Miller 在 1969 年提出来的^[5]。随后 1993，美国空军科学研究实验室的 Richard A. Soref 提出了的硅基光电子集成芯片的概念^[6]，见图 1-2 (a)。硅基光电子芯片是在同一片硅衬底上集成了负责逻辑和驱动的晶体管，负责光通信的激光器，调制器，光放大器，光探测器，光无源结构，光波导和光纤的耦合结构。在接下来的 20 多年内，全世界的知名高校和半导体公司都投入大量资金到这个领域中。在 2011 年，见图 1-2 (b)，Intel 厚积薄发推出了世界上第一个硅基光通信芯片包含了片上的激光器，纯硅调制器和硅锗探测器的光通信模块，实现了单通道 12.5 Gbps 的传输速率^[7]。在 2012 年，见图 1-2 (c, d)，IBM 紧接发布了利用改进的 90 nm CMOS 工艺线，实现了在单个硅片上同时集成晶体管和的 25 Gbps 的光调制器和探测器^[8]。Intel 虽然集成了激光器但是没能在单片上同时集成晶体管，而 IBM 虽然集成了晶体管，却没能集成激光器并且缺少完整光收

发链路的展示。在 2015 年，美国伯克利大学和麻省理工大学的 Chen Sun 等首次展示了直接在商业化的 45 nm CMOS 流水线上，制作硅基光电子集成芯片^[9]。该单块芯片，见图1-3 (a)，上不仅包含处理器，内存，还包含光收发模块。并且他们还展示了如图 1-3 (b) 所示的处理器芯片和内存的芯片直接用光互联技术进行时时数据的运算和处理。虽然该硅基光电子芯片依旧缺少片上的激光器和放大器，但是该芯片是目前最复杂的单片硅基光电子芯片，包含了 700 万个晶体管和 850 个光模块。

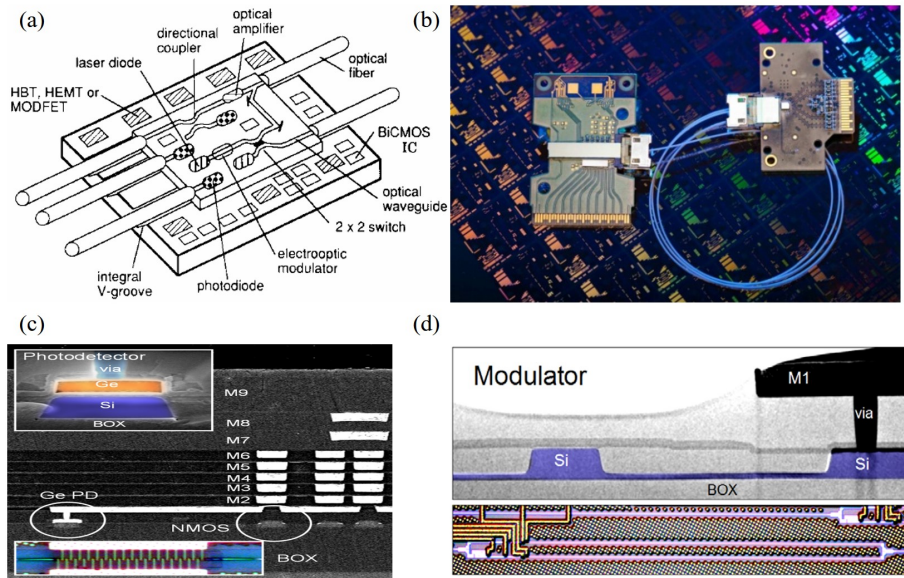


图 1-2 (a) 最早的硅基光电子芯片概念图^[6]；(b) Intel 的硅基光收发模块^[7]；(c, d) IBM 的硅基探测器和调制器^[8]

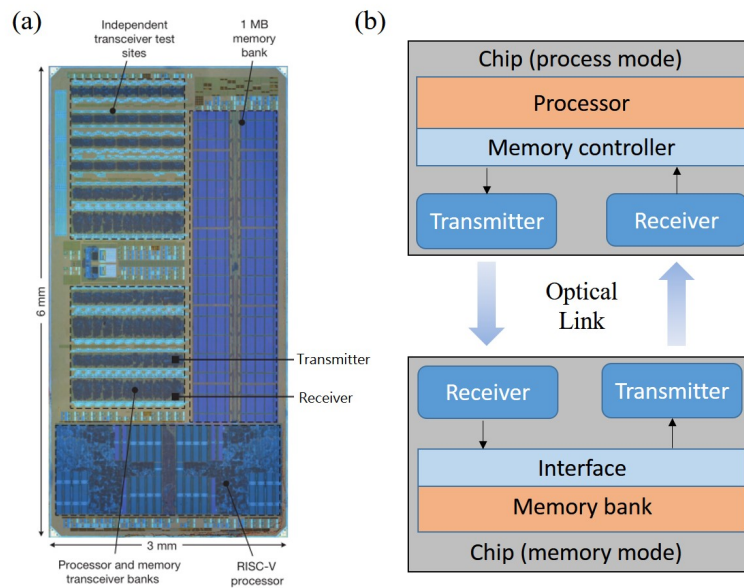


图 1-3 (a) 单片硅基光电子芯片，包含处理器，内存，光收发模块^[9]；(b) 处理器芯片和内存芯片间光互联示意图^[9]

1.2 硅基光调制器

1.2.1 硅基光调制器的指标

1.2.2 硅基光调制器的种类

1.3 论文的内容和创新点

1.3.1 论文内容

1.3.2 论文创新点

2 光器件的基本仿真方法

2.1 波导的仿真

2.2 器件的仿真

2.3 系统的仿真

2.4 多量子阱结构的仿真设计

2.5 高速电极的仿真

3 低驱动电压硅基电吸收调制器

本章概述了低驱动电压光调制器，详细介绍了低驱动电压电吸收调制器的理论原理和公式。最后阐述了利用电吸收调制器的双工作模式实现单片多波长复用的光收发模块。

3.1 低驱动电压光调制器概述

3.2 混合集成调制器的设计

3.3 混合集成调制器的制作

3.4 性能测试

3.5 电吸收调制器的双工作模式

3.6 硅基单片集成的光收发模块

4 硅基反射微环的光调制器

4.1 反射环概述

4.1.1 可调反射率微环

4.1.2 光栅反射微环

4.2 可调反射率微环调制器的设计

4.3 光栅反射微环调制器的设计

4.3.1 光栅反射环的设计

4.3.2 光栅反射环的制作

4.3.3 无源性能测试

5 高速光调制器电极的设计

5.1 高速光调制器概述

5.2 电极设计

5.3 电吸收调制器不同电极的比较

6 总结与展望

参考文献

- [1] M. Zuffada. The industrialization of the silicon photonics: Technology road map and applications[C]//Solid-State Device Research Conference (ESSDERC), 2012 Proceedings of the European. Sept 2012:7–13.
- [2] J. Shah. DARPA’S EPIC program: electronic and photonic integrated circuits on Si[C]//Group IV Photonics, 2005. 2nd IEEE International Conference on. Sept 2005:1–3.
- [3] HELIOS project. <http://www.helios-project.eu/>.
- [4] Y. Arakawa, T. Nakamura, Y. Urino, T. Fujita. Silicon photonics for next generation system integration platform[J]. Communications Magazine, IEEE, March 2013. 51(3):72–77.
- [5] Stewart E Miller. Integrated optics: an introduction[J]. Bell System Technical Journal, 1969. 48(7):2059–2069.
- [6] Richard A. Soref. Silicon-based optoelectronics[J]. Proceedings of the IEEE, Dec 1993. 81(12):1687–1706. doi:10.1109/5.248958.
- [7] Mario J. Paniccia. A perfect marriage: optics and silicon[J]. Optik & Photonik, 2011. 6(2):34–38.
- [8] S. Assefa, S. Shank, W. Green, et al. A 90nm cmos integrated nano-photonics technology for 25gbps wdm optical communications applications[C]//Electron Devices Meeting (IEDM), 2012 IEEE International. Dec 2012:33.8.1–33.8.3.
- [9] Chen Sun, Mark T Wade, Yunsup Lee, et al. Single-chip microprocessor that communicates directly using light[J]. Nature, 2015. 528(7583):534–538.

索引

TeX, [V](#)

作者简历

1. 第一条的内容
2. 第二条内容

发表文章目录

1. 第一篇
2. 第二篇