

# 基于 Franz-Keldysh 效应的倏逝波锗硅电吸收调制器设计\*

李亚明 刘智 薛春来 李传波 成步文<sup>†</sup> 王启明

(中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

(2012 年 12 月 26 日收到; 2013 年 2 月 19 日收到修改稿)

本文设计了一种基于 Franz-Keldysh (FK) 效应的 GeSi 电吸收调制器. 调制器集成了脊形硅单模波导. 光由脊形硅波导以倏逝波形式耦合进锗硅吸收层. 在硅基锗二极管 FK 效应实验测试的基础上, 有源区调制层锗硅中的硅组分设计为 1.19%, 从而使得器件工作在 C (1528—1560 nm) 波段. 模拟结果显示该调制器的 3 dB 带宽可达 64 GHz, 消光比为 8.8 dB, 而插损仅为 2.7 dB.

**关键词:** 锗硅, 调制器, 电光集成

**PACS:** 42.79.Hp, 68.55.ag

**DOI:** 10.7498/aps.62.114208

## 1 引言

硅材料作为微电子领域的传统材料, 在加工工艺和制作成本上有着绝对的优势. 随着人们对大容量、宽带宽、低成本信息传输系统的需求, 有力推动了硅基光电子学的发展<sup>[1,2]</sup>. 硅基光调制器是这一系统中关键器件之一. 近十年里调制器有了长足的发展<sup>[3-9]</sup>, 器件的 3 dB 带宽最高已经高达至 50 GHz<sup>[10]</sup>. 由于 Si 的弱电光效应, 这些调制器大多基于自由载流子色散效应. 在调制器中操控载流子的浓度变化以实现光的调制难于实现 3 dB 带宽、消光比、光学带宽和功耗之间的平衡. 而电吸收调制器并不依赖于载流子的浓度变化, 同时能获得高 3 dB 带宽, 低功耗, 实用的光学带宽和消光比. 但是由于硅的电光效应很弱, 因此需要引入其他材料, 而且这种材料需要满足以下特性: 1) 在 C 波段内有显著的电光效应; 2) 与传统的 CMOS 工艺完全兼容. 锗完全满足了上述两个要求. 首先我们已经观察到硅基锗二极管的显著 FK 效应, 即当对 Ge 施加偏压时或改变材料内部电场时, 锗的吸收谱红移, 波长大于 1.55  $\mu\text{m}$  (对应于锗的直接带隙) 的一

定波段内光的吸收系数有显著变化. 而且这是一种电容作用, 不需要操纵载流子浓度, 因此这一显著 FK 效应可以用于片上光互连电吸收调制器. 但是锗并不能直接使得器件工作在 C 波段, 需要在锗中引入一定的硅, 用锗硅代替锗<sup>[11]</sup>. 其次, 锗与硅同属四族材料, 与标准的 CMOS 工艺完全兼容. 由于锗材料的上述特性, 硅基锗电吸收调制器逐渐成为国际研究的热点<sup>[12-14]</sup>. 在本文中, 我们提出一种新型锗硅电吸收调制器. 通过设计有源层锗硅中硅的组分, 调制器工作波段可覆盖大部分 C 波段. 由于电吸收调制器的带宽主要由电阻和电容决定, 我们预测这种调制器的 3 dB 带宽可达  $\sim 64$  GHz, 对于 1.55  $\mu\text{m}$  波长的光, 62.5 kV/cm 外加电场时, 该调制器的消光比可达 8.8 dB, 而插损仅为 2.7 dB.

## 2 材料设计

根据硅基锗二极管 FK 效应的测试, 我们观察到当电场由 0 kV/cm 变为 62.5 kV/cm 时, 在 1.62—1.64  $\mu\text{m}$  范围内光的吸收系数有明显变化,  $\Delta\alpha/\alpha > 2$ <sup>[11]</sup>. 其中  $\alpha$  是光在 0 kV/cm 时的吸收系数,  $\Delta\alpha$  是光的吸收系数变化. 为了使这一吸收系数

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61036003, 61176013, 60906035, 61177038) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2011AA010302) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: cbw@red.semi.ac.cn

变化明显的波段移至片上光互连通信 C 波段, 需要增加锗的直接带隙. 由于锗硅都是四族材料, 能进行任何配比的组合且硅的直接带隙大于锗, 因此可通过在锗中引入一定量的硅, 即用锗硅代替锗作为有源层.

锗硅中硅的组分由线性插入法确定. Ge 的电场致吸收系数变化明显波段 1.62—1.64  $\mu\text{m}$  移至 1.54—1.56  $\mu\text{m}$  波段, 带隙需要增加约 0.039 eV (80 nm). 锗硅的带隙变化有如下公式<sup>[15,16]</sup>:

$$\begin{aligned} \Delta E_g^{\text{dir}} &= E_g^{\text{dir}}(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x) - E_g^{\text{dir}}(\text{Ge}) \\ &= 3.26x. \end{aligned} \quad (1)$$

根据 (1) 式, 计算得到的 Si 组分为 1.19%.

FK 效应一般发生在带边. 由于外加偏压, 能量低于禁带宽度的光子吸收系数将发生比较显著的变化. 其定量表达式为

$$\begin{aligned} \alpha(\omega) &= \frac{e^2 E_p}{12n_r c \epsilon_0 m_0 \omega} \left( \frac{2m_r}{\hbar^2} \right)^{3/2} \\ &\quad \times \sqrt{\hbar\theta_F [-\eta \text{Ai}^2(\eta) + \text{Ai}'^2(\eta)]}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $E_p$  是跃迁矩阵元,  $m_r$  是材料的约化质量,  $F$  是外加电场,  $E_g$  是材料的禁带宽度,  $\hbar\omega$  是入射光子能量,  $\text{Ai}$  和  $\text{Ai}'$  是艾里函数及其导数. 参数  $\hbar\theta_F$  和  $\eta$  为

$$\begin{aligned} \hbar\theta_F &= \left( \frac{\hbar^2 e^2 F^2}{2m_r} \right)^{1/3}, \\ \eta &= \frac{E_g - \hbar\omega}{\hbar\theta_F}. \end{aligned} \quad (3)$$

引入变量  $B$ ,

$$B = \frac{\hbar e^2}{12n_r c \epsilon_0 m_0} \left( \frac{2m_r}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{\hbar\theta_F}, \quad (4)$$

(2) 式可简写为

$$\alpha(\omega) = \frac{B E_p}{\hbar\omega} [-\eta \text{Ai}^2(\eta) + \text{Ai}'^2(\eta)], \quad (5)$$

$B$  是包含材料电子和空穴有效质量的变量.

锗硅在 1.54—1.56  $\mu\text{m}$  波段吸收系数及其变化可根据 (5) 式, 由锗在 1.62—1.64  $\mu\text{m}$  波段的吸收系数得到

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{GeSi}}(\hbar\omega) &= \alpha_{\text{Ge}}(\hbar\omega - 0.039) \cdot \frac{B^{\text{GeSi}}}{B^{\text{Ge}}} \\ &\quad \times \frac{E_p^{\text{GeSi}}}{E_p^{\text{Ge}}} \frac{\hbar\omega - 0.039}{\hbar\omega}. \end{aligned} \quad (6)$$

由 (1) 式计算得到 Si 组分仅为 1.19%, 锗硅与锗的电子和空穴有效质量几乎相等, 差别在测量误

差范围以内, 因此方程 (2) 中右边第二项等于 1. 光学跃迁矩阵元是材料带隙的函数, 因此也与硅-锗或者硅-锗材料系热膨胀系数差导致的张应变有关. 热膨胀致张应变后的锗硅的光学跃迁矩阵元可表示为<sup>[10]</sup>

$$\begin{aligned} E_p &= 3(m_0/m_c + 1) / (1/E_g^\Gamma(lh) + 1/E_g^\Gamma(hh) \\ &\quad + 1/E_g^\Gamma(so)). \end{aligned} \quad (7)$$

$\Gamma$  能谷处的轻空穴, 重空穴和自旋轨道分裂与导带底之间的带隙可通过单轴应变形势理论得到<sup>[17]</sup>. 由于需要引入的硅组分仅为 1.19%, 硅上外延的锗硅和锗热膨胀导致的张应变应该相等. 由 (7) 式计算得到在引入硅组分前后, 锗材料的光跃迁矩阵元分别为 26.25 eV 和 26.42 eV. 其相对变化小于 1%. 因此方程 (6) 右边跃迁矩阵元比值可简化为 1. 图 1(a) 是由 (6) 式计算得到, 硅组分为 1.19% 时电场分别为 0 kV/cm 和 62.5 kV/cm 的吸收系数计算结果. 在 1.54—1.56  $\mu\text{m}$  波段内有  $\Delta\alpha/\alpha > 2$ . 图 1(b) 是波长为 1.55  $\mu\text{m}$  的光在不同电场时的吸收系数. 在 0 kV/cm 和 62.5 kV/cm 时, 吸收系数分别为 107.4/cm 和 436/cm. 它们将分别设定为调制器开态和关态.

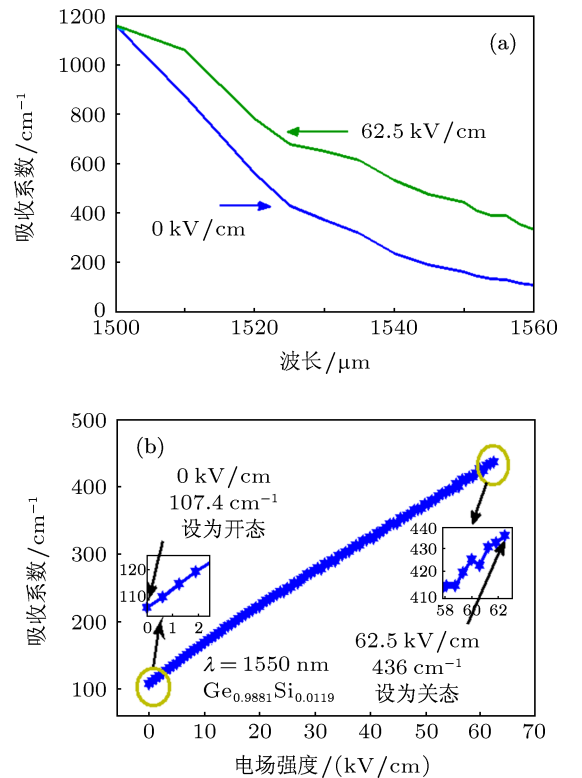


图 1 (a) 0 kV/cm 和 62.5 kV/cm 时锗硅的吸收系数; (b) 波长为 1.55  $\mu\text{m}$  时不同电场下的吸收系数

### 3 结构设计和模拟结果

器件有源区采用 p-i-n 结构, 电场方向垂直于衬底. 图 2(a) 和 (b) 分别是器件俯视图和剖面结构示意图. 整个器件结构是设计在 SOI 晶片上. SOI 晶片的顶层硅厚度为  $0.22\ \mu\text{m}$ , 埋氧层厚为  $2\ \mu\text{m}$ . 光由脊形单模波导进入多模区, 最后聚焦耦合输出到脊形单模波导. 脊形单模波导的刻蚀深度为  $100\ \text{nm}$ , 脊宽为  $400\ \text{nm}$ , 经 Rsoft 模式求解器和有效折射率计算, 脊形波导满足单模工作条件. 调制区位于多模区上, 宽度与多模区宽度相同, 如图 2(a) 所示. 有源区中的锗硅可通过选择异质外延到 SOI 上.

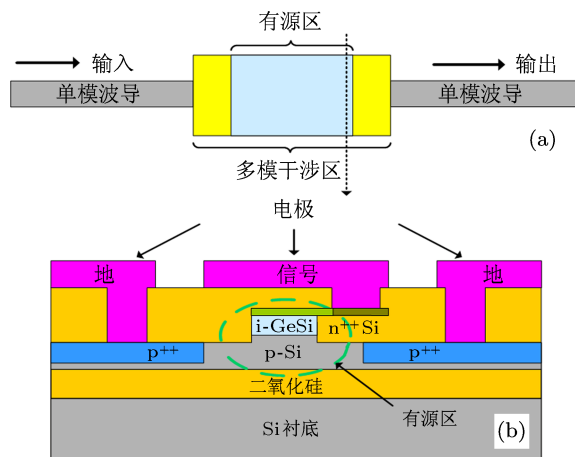


图 2 (a) 调制器俯视图; (b) 调制器有源区剖面图

有源区脊形硅波导进行轻掺杂, 以减小器件电阻, 掺杂浓度为  $1.5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ . 在掺杂硅脊形波导上选择外延锗硅形成调制区. 为了避免金属与锗硅直接接触, 减小金属电极对调制器中光的吸收, 由重掺杂多晶硅取代锗硅与金属 Al 形成上电极的欧姆接触. 重掺杂多晶硅掺杂浓度为  $10^{20}/\text{cm}^3$ , 厚度为  $100\ \text{nm}$ . 欧姆接触距离脊形波导  $0.5\ \mu\text{m}$ . 分别距离脊形波导两侧各  $1.5\ \mu\text{m}$  是重掺杂的 p 型区, 以形成下电极的欧姆接触. p 型掺杂浓度为  $10^{20}/\text{cm}^3$ .

对于硅基片上光互连, TE 模可以实现低损耗和小的弯曲半径. 因此在模拟设计中只考虑 TE 模的情况. 硅波导和调制器的光传播采用半矢量束传播法 (semi-vector BPM). 束传播法广泛引用用于集成光电子器件, 具有很高的计算效率和精度

设计中有四个主要变量需要优化设计: 多模区 (或调制器区) 的宽度  $w$ , 多模区的长度  $L$ , 锗层的厚度  $t$  和调制器有源区的长度  $l$ .

硅锗的选择外延实验发现, 由于锗硅垂直和水平外延生长速度不同, 导致外延薄膜与 SOI 的顶层硅表面形成大约为  $26^\circ$  倾角. 当这个宽度很窄时, 锗或锗硅的外延层趋向于一个尖峰, 不利于后续电极的制作, 同时也限制了外延层的厚度, 如图 3 所示.

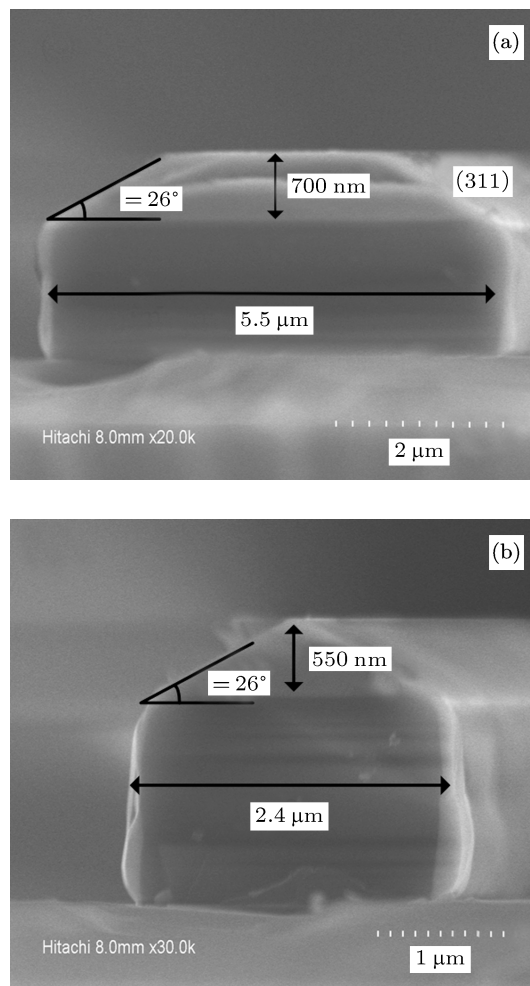


图 3 不同宽度 Si 条上外延的锗薄膜 SEM 图样 (a)  $5.5\ \mu\text{m}$ ; (b)  $2.4\ \mu\text{m}$

为了获得一个平坦的上平台, 我们设计调制器有源区宽度为  $4\ \mu\text{m}$ . 当外延的锗硅厚度为  $0.5\ \mu\text{m}$  时, 上平台宽度约为  $2\ \mu\text{m}$ , 上平台足够宽以实现电极的制作. 宽的有源区必然导致产生多个波导模式. 为了减小多模区与单模区之间的模式耦合损耗, 多模区的长度等于多模干涉成单像时长度的整数倍, 使得光场经过多模区后仍能汇聚. 当有源区或多模区宽度为  $4\ \mu\text{m}$  时, 经 BPM 模拟, 该长度为  $37.7\ \mu\text{m}$ , 并且该长度基本不受锗硅厚度的影响.

为了研究锗硅厚度对波导与调制器之间耦合效率的影响, 我采用了一个探测器模型. 设置锗硅

在 1550 nm 波长处的吸收系数为 436/cm, 一定长度内吸收的光功率越多, 说明耦合效率越高. 在不同锗硅厚度时的光功率吸收如图 4 所示. 光由脊形硅波导倏逝耦合到锗硅层被吸收的光功率与锗硅厚度成正比. 但是为了提高硅波导至锗硅调制层之间的耦合效率, 锗硅的厚度不能无限增加. 180 nm CMOS 工艺技术下的芯片提供的电压为 3.3 V. 因此为了达到调制器关态时的电场强度 62.5 kV/cm, 锗硅调制层不应该超过 0.52  $\mu\text{m}$ . 本文中锗硅的厚度选为 0.5  $\mu\text{m}$ , 达到 62.5 kV/cm 电场强度时所需的电压值为 3.1 V.

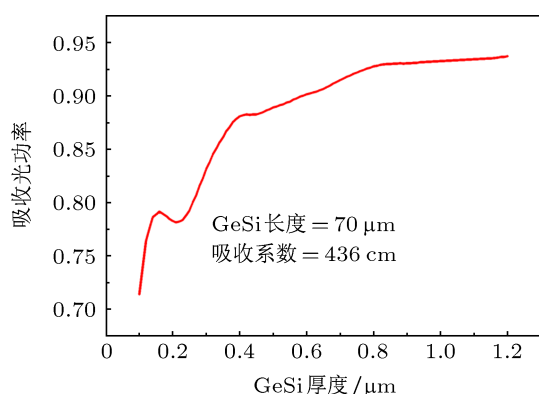


图 4 不同锗硅厚度对应的光功率吸收率

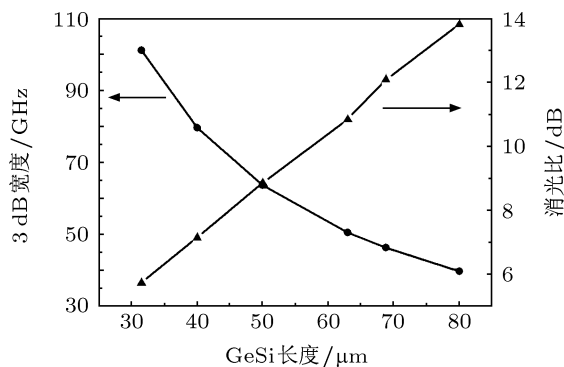


图 5 不同有源区长度时的 3 dB 带宽和消光比 (参数如下:  $w = 4 \mu\text{m}$ ,  $t = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $L = 37.7 \mu\text{m}$ )

由于该类器件的有源区长度一般小于 100  $\mu\text{m}$ , 在 100 GHz 以下的调制频率下, 器件可处理成集总型器件, 而不必考虑如基于硅等离子效应的 MZI 调制器行波电极的问题, 电学设计上相对简单. 器件的 3 dB 带宽由  $f = 1/2\pi RC$  计算所得. 其中  $R$  等于系统特征阻抗 50  $\Omega$ . 器件的电容由商业软件 Silvaco 计算得到. 图 5 所示为对于波长为 1.55  $\mu\text{m}$

的光, 锗硅层厚度为 500 nm, 宽为 4  $\mu\text{m}$  时不同有源区长度时对应的 3 dB 带宽和消光比. 综合图 3 可知, 调制器的 3 dB 带宽和消光比之间相互制衡. 对于有源区长度为 50  $\mu\text{m}$  的调制器, 器件的 3 dB 带宽约达 64 GHz, 同时消光比为 8.8 dB. 其在开态和关态的光路传播图如图 6 所示. 左边为电压为 0 V 时即开态, 右边为 3 V 即关态的光场分布. 模拟表明器件的插损仅为 2.7 dB. 有源区长度为 50  $\mu\text{m}$  调制器的电容为 52 fF, 由于器件工作在反偏状态, 静态电流很小, 其功耗主要来自在器件开态和关态的转换过程, 根据文献 [18] 的计算方法, 计算得到的器件功耗为 117 fJ/bit, 低于目前报道的所有基于硅基等离子色散效应 MZI 调制器的功耗. 从有源区长度为 50  $\mu\text{m}$  的调制器的各项性能指标看, 本文提出的锗硅倏逝波电吸收调制器, 实现了 3 dB 带宽, 低功耗, 实用的光学带宽和可接受的消光比之间的平衡, 在硅基调制器中具有非常大的潜力.

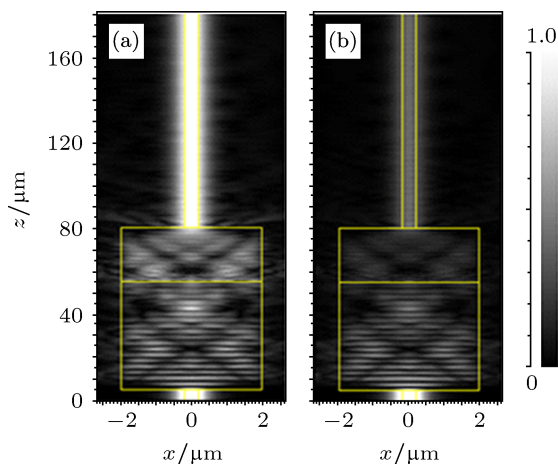


图 6 有源区长度为 50  $\mu\text{m}$  的 EA 调制器开态 (a) 和关态 (b) 的光传播图

## 4 结论

我们提出一种与脊形单模波导集成的新型倏逝波电吸收锗硅光调制器. 在锗硅吸收层中, 硅的组分选择为 1.19%, 器件的工作波段覆盖了大部分 C 波段. 模拟结果表明器件有良好的性能, 器件的 3 dB 带宽达 64 GHz, 消光比和插损分别为 8.8 dB 和 2.7 dB, 器件的功耗仅为 117 fJ/bit. 器件的高带宽、大消光比、低功耗、低插损和与 CMOS 工艺兼容等特点使得该类调制器成为片上光互连用光调制器的有力竞争者.

- [1] Miller D 2000 *Proc. IEEE* **88** 728  
 [2] Soref R 2006 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **12** 1678  
 [3] Reed G, Mashanovich G, Gardes F, Thomson D 2010 *Nature Photonics* **4** 518  
 [4] Xu Q, Schmidt B, Pradhan S, Lipson M 2005 *Nature* **435** 325  
 [5] Xu Q, Manipatruni S, Schmidt B, Shakya J, Lipson M 2007 *Optics Express* **15** 140  
 [6] Feng N, Liao S, Feng D, Dong P, Zheng D, Liang H, Shafiiha H, Li G, Cunningham J, Krishnamoorthy A, Asghari M 2010 *Opt. Express* **18** 7994  
 [7] Liao L, Liu A, Rubin D, Basak J, Chetrit Y, Nguyen H, Cohen R, Izhaky N, Paniccia M 2007 *Electronics Letters* **43** (22)  
 [8] 陈少武, 余金中, 屠晓光 2006 *物理* **35** (04)  
 [9] 余金中, 孙飞 2005 *物理* **34** (01)  
 [10] Thomson D, Gardes F, Fedeli J, Zlatanovic S, Myslivets E, Radic S, Mashanovich G, Reed G 2012 *Photonic Technology Letters* **24** 234  
 [11] Li Y, Hu W, Cheng B, Liu Z, Wang Q 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** (3)  
 [12] Liu J, Pan D, Jongthammanurak S, Wada K, Kimerling L, Michel J 2007 *Optics Express* **15** 623  
 [13] Lim A, Liow T, Qing F, Duan N, Ding L, Yu M, Lo G, Kwong D 2011 *Optics Express* **19** 5040  
 [14] Feng N, Feng D, Liao S, Wang X, Dong P, Liang H, Kung C, Qian W, Fong J, Shafiiha R, Luo Y, Cunningham J, Krishnamoorthy A, Asghari M 2011 *Optics Express* **19** 7062  
 [15] Madelung O, Landolt-Börnstein 1982 *Physics of Group IV Elements and III-V Compounds: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology* (Springer, Berlin) 17a pp449–454  
 [16] Levinshtein M, Rumyantsev S, Shur M 2001 *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe* (Wiley, New York) Chap.6  
 [17] Pollak F, Cardona M 1968 *Phys. Rev.* **172** 816  
 [18] Miller D A B 2012 *Optics Express* **20** A293

# Design of an evanescent-coupled GeSi electro-absorption modulator based on Franz-Keldysh effect\*

Li Ya-Ming   Liu Zhi   Xue Chun-Lai   Li Chuan-Bo  
 Cheng Bu-Wen<sup>†</sup>   Wang Qi-Ming

(Institute State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 26 December 2012; revised manuscript received 19 February 2013)

## Abstract

We present a novel GeSi electro-absorption (EA) modulator design on a silicon-on-insulator platform. The GeSi EA modulator is constructed based on the Franz-Keldysh (FK) effect. The light is evanescent-coupled into the GeSi absorption layer from the rib Si waveguide. A content of 1.19% Si in SiGe absorption layer is chosen for C (1528—1560 nm) band operation. Simulation shows a high (3 dB) bandwidth of ~ 64 GHz and extinction ratio of 8.8 dB. Especially the insertion loss is as low as 2.7 dB.

**Keywords:** GeSi, modulator, electro-optical integration

**PACS:** 42.79.Hp, 68.55.ag

**DOI:** 10.7498/aps.62.114208

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61036003, 61176013, 60906035, 61177038), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA010302).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: cbw@red.semi.ac.cn