

# Silicon Substrate Interconnection Circuit Design

Xiong Tang, Rensen Fan, Zhengfei Ma, Kaikai Xu, Qi Yu

Microelectronics and Solid Electronics Institute, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan

Email: modetx50@gmail.com

Received: May 28<sup>th</sup>, 2016; accepted: Jun. 18<sup>th</sup>, 2016; published: Jun. 21<sup>st</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

According to Moore's Law, chip integration density continues to increase. Because of limited electrical interconnection physical characteristics, the transmission delay, bandwidth, density and power consumption of the traditional on-chip interconnect technology and other key performance indicators are difficult to be improved, which have become resistance and bottleneck to further enhance the SoC performance. Instead, optical interconnect signal transmission has low loss, high speed, low latency and high bandwidth density advantages. Therefore, optical interconnection technology has potential advantages in the application of SoC. This paper describes the implementation of the simple optical interconnection circuit under the standard CMOS process and the basic light principle light of light-emitting device. Silicon light source plays an important role in the interconnection; the paper made a focus on the silicon light-emitting, and reviewed the last few years' research about silicon light source. Based on previous research, we design a MOS tube light-emitting device, and the electrical and optical characteristics of the device simulation and analysis. Based on these results, we design a preliminary silicon chip interconnect circuit which may play an important role in future optical interconnects.

## Keywords

MOSFET Light Emitting Device, Silicon Substrate Light Emitting Device, Silicon Substrate Optical Interconnection Circuit

---

# 硅基片上光互连电路设计

唐 雄, 范仁森, 马正飞, 徐开凯, 于 奇

文章引用: 唐雄, 范仁森, 马正飞, 徐开凯, 于奇. 硅基片上光互连电路设计[J]. 光电子, 2016, 6(2): 47-53.

<http://dx.doi.org/10.12677/oe.2016.62008>

电子科技大学微电子与固体电子学院, 四川 成都  
Email: modetx50@gmail.com

收稿日期: 2016年5月28日; 录用日期: 2016年6月18日; 发布日期: 2016年6月21日

## 摘要

根据摩尔定律, 芯片的集成度不断提高, 传统的片上互连技术由于受到电互连物理特性的限制, 其传输延迟、带宽密度和功耗等关键性能指标很难有质地提升, 成为制约片上互连性能进一步提升的瓶颈。相比之下, 光互连信号传输具有损耗低、速度快、延迟低、带宽密度高的优势。因此, 光互连技术在片上系统的应用中具有潜在优势。文章采用MOS管发光器件实现硅基光互连系统单片集成。由于硅光源在光互连中扮演着重要角色, 所以本文对硅基发光做了重点研究, 并对过去几年硅光源研究成果进行回顾。基于前人的研究成果, 我们设计了MOS管发光器件, 并对该器件的电学特性和光学特性进行了仿真和分析, 基于这些结果, 然后对硅基片上光互连进行初步的设计, 有望在未来光互连中发挥重要作用。

## 关键词

MOS管光发射器件, 硅基发光器件, 硅基光互连电路

## 1. 引言

随着信息时代的到来, 人们对信息传输的要求日益提高, 高速度低损耗都是对现代信息传输系统的基本要求, 而依靠传统的电荷进行信息运输对这些要求无法很好地满足, 电互连已经成为提升系统性能的瓶颈, 器件之间的连接成为一个迫切需要解决的问题。20世纪八十年代就有人意识到点互连的限制问题, 1984年, Goodman首先提出并分析了在大规模集成电路内采用光互连替代电互连的思想[1]。光互连有很多优点, 例如: 光学信号在空间可以独立传播, 彼此之间互不干扰; 光互连的速度与互连通道无关; 光学信号在三维空间可以自由传播。那么光子替代电子不仅能提高带宽密度, 而且可以提高速度, 解决数据线间电磁干扰问题, 有研究表明实现相同的计算光互连功耗更低。所以硅基光集成电路成为当今研究热点, 该课题也处于摸索阶段, 光发射器、探测器的效率和光波导的耦合效率都相当低, 高速度、高可靠性的光互连系统更是发展缓慢。

本文针对硅基上光互连集成电路展开了探讨, 用比较成熟的CMOS工艺来实现光互连电路。

## 2. 硅发光器件

目前已经有多种实现硅基发光的方法, 如多孔硅发光、掺Er硅发光、超晶格量子阱结构等, 然而这些方法至今没有得倒广泛的应用, 主要原因就在于其材料或者器件结构不能满足当今光电子单片集成对发光器件工艺和发光效率的要求。所以, 目前全硅光电集成遇到的主要困难就在于要能与标准CMOS工艺兼容的发光器件。通常来讲, 与标准CMOS工艺兼容的硅基发光器件(Si-LED)是指利用PN结反向击穿或正向少子注入进行发光的器件, 结构较为简单, 制作工艺与当前标准的超大规模集成电路CMOS工艺兼容[2]。本文对提高这类器件的发光效率和改善器件结构进行了尝试。

### 2.1. 雪崩击穿主要发光机制[3]

#### 1) 间接带间跃迁

间接带间跃迁指的是导带与价带之间有声子辅助的跃迁过程，这一过程中电子和空穴复合包括两部分内容：一是硅的倒带底电子与价带顶空穴复合，能量差作为光子释放，二是相差的动量差以声子形式释放。光子能量由  $h\nu = E_g - E_p$  决定，当  $E_g$  不变时，发射的光子由跃迁过程中声子能量  $E_p$  决定，因此不同位置的电子在跃迁过程中发出不同波长的光子。

Gautam 提出发射光的强度是与电子和空穴的分布函数和复合几率相关的函数[4]:

$$I(\nu)_{\text{indirectinterband}} = I(\nu)_{\text{Emission}} - I(\nu)_{\text{Absorption}} \quad (3-1)$$

其中

$$I(\nu)_{\text{Emission}} \propto n^2 \left[ \nu \frac{dn}{d(\nu)} + n \right] \nu^2 A \exp \left[ -\frac{h\nu + k\theta}{k_0 T_h} \right] \exp \left[ \frac{h\nu + k\theta}{k_0 T_h} \right] \cdot \exp \left[ \frac{-\alpha A}{2} \right] I_1 \left( \frac{\alpha A}{2} \right) \quad (3-2)$$

$$I(\nu)_{\text{Absorption}} \propto n^2 \left[ \nu \frac{dn}{d(\nu)} + n \right] \nu^2 B \exp \left[ -\frac{h\nu + k\theta}{k_0 T_h} \right] \exp \left[ \frac{h\nu + k\theta}{k_0 T_h} \right] \cdot \exp \left[ \frac{-\alpha B}{2} \right] I_1 \left( \frac{\alpha B}{2} \right) \quad (3-3)$$

式中， $T$  代表硅晶格温度， $A = (h\nu + k\theta - E_g)$ ， $B = (h\nu - k\theta - E_g)$ ， $\alpha = [1/k_0 T_e + 1/k_0 T_h]$ ， $n$  是折射率， $I_1$  是修正 Bessel 一阶函数， $T_e$  和  $T_h$  的值分别取决于半导体材料中电子和空穴的电离长度以及电场强度。

## 2) 直接带间跃迁

这一机制主要描述了处于  $K$  空间同一波矢处，高能自由电子直接跃迁与空穴直接复合，辐射光子的过程。Wolff 对高场强下的电子和空穴利用 Boltzmann 方程求解，来阐述电子与声子的效应和载流子分布函数，并推导出了发射强度与光子能量的关系[5]:

$$I(\mu)_{\text{DirectInterband}} = B_1 (h\nu - E_g)^{1/2} h\nu [1 + B_2 (h\nu/W)] \exp[-(h\nu/W)] \quad (3-4)$$

式(3-4)中，依赖于电场强度和平均自由程  $W \sim kT$ ， $B_1$  是一个经验常数， $B_2$  则取决于  $(E_0/W)$  仿真的指数积分  $\bar{E}_i$ ， $E_0$  表示的是电子空穴对产生的阈值能量。Akil 等人认为，对于能量范围较小(约在 2.0 eV 以下)的电子来说，由声子辅助的带间的间接跃迁占主导地位；而在 2.0 eV~2.3 eV 范围内，带内制动辐射占主导地位；对于能量大于 2.3 eV，主要由雪崩击穿加速的高能热电子，有机会突破间接跃迁的限制，与相同波矢处的空穴复合发光。以上根据雪崩击穿后电子能量的不同、位置的不同，因而发生跃迁发光机制也不相同的理论，称之多机制的发光模型[6]。该模型能对硅基发光做出较为准确的理论解释。

## 2.2. 前人用 CMOS 工艺所做的光发射器件

图 1 是中芯国际采用 0.18  $\mu\text{m}$  的 CMOS 工艺生产的 MOS 隧穿二极管，采用 1.8 V MOS 器件的栅氧作为隧道二极管的绝缘层。整个器件做在 N 阱中，多晶硅栅和 N+阱接触设计成插指状，以提高电场的均匀性与发光的一致性。所有栅极连在一起用金属引出，所有 N 阱接触同样连在一起用金属引出。多晶硅栅与 N 阱接触之间的间距要设置合理，既要保证合适电场分布，以便发射光能够顺利到达芯片外，减少半导体和金属对发射光的吸收。

## 2.3. MOS 管发光器件基本原理

普通雪崩击穿二极管实际上是指常见的 PN 结。在标准 CMOS 工艺中，可利用重掺杂的源/漏区和衬底或 N 阱分别形成  $P^+N$  或  $N^+P$  结，当源/漏极与衬底反偏，通常击穿电压大于  $6 E_g/q$ ，产生雪崩击穿。

如图 2 是光发射器件结构浓度分布图，由结构图不难看出，与传统 LED 结构相似，当源/漏与衬底反偏电压满足条件时，在栅氧两侧一定深度即会发生雪崩击穿，实现硅基发光，栅极可以在一定程度上来控制发光的强度。

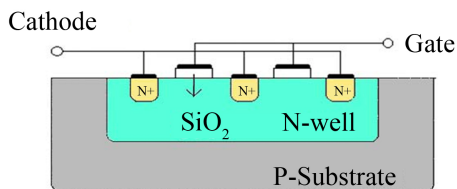


Figure 1. MOS Tunnel breakdown sectional view

图 1. MOS 隧穿二极管剖面图

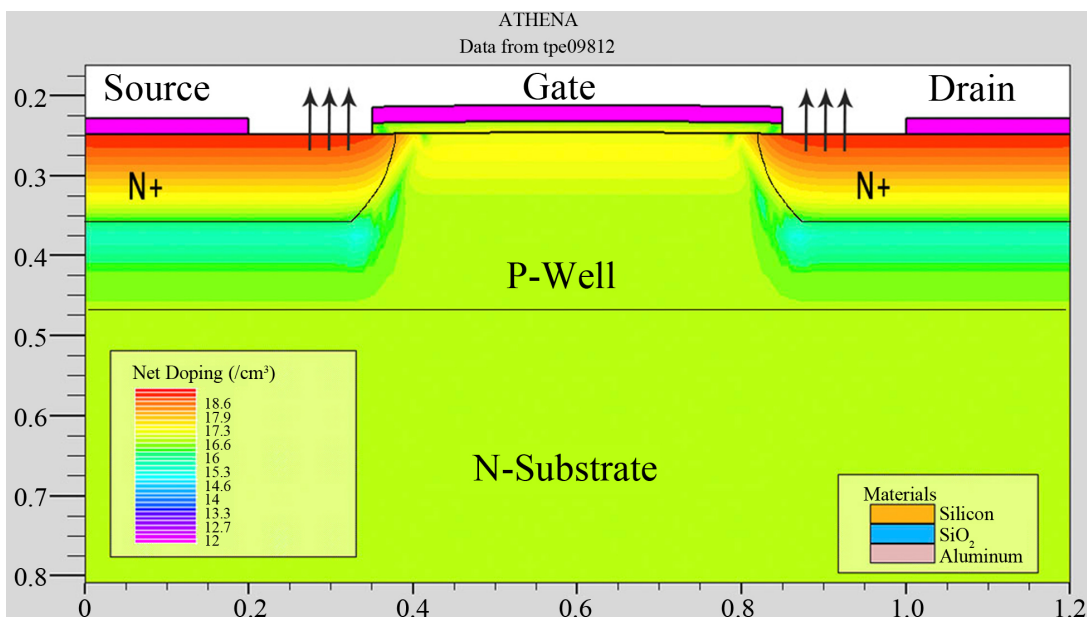


Figure 2. Light emitter device structure under standard CMOS process

图 2. 标准 CMOS 工艺下光发射器件结构图

## 2.4. MOS 管光发射器件的测试与仿真

系统在受到外界因素作用后吸收外部能量的过程称为激发，可见激发发光是一种典型的能量转换过程，该系统受到激发利用从外界获得的能量，就能够从稳定的低能态跃迁到不稳定的高能态。相反地，当系统从不稳定的高能态重新回到稳定的低能态时，由于必须能量守恒，便可能以光的形式释放出其多余的能量。

当普通 P/N 结或金属-半导体接触等结构反向偏置，且电场增强到足以发生雪崩击穿时，在碰撞电离雪崩倍增的过程中，电场的能量直接以加速电子的方式转移为晶体中电子的能量，使得电子获得足够的能量进入激发态。

在栅氧层下一定深度即是光源，图 3(a) 是对应的是源/漏与衬底 5 v 偏压时器件内部电场强度分部，在宽约 0.1  $\mu\text{m}$  的范围电场强度大于  $2 \times 10^5 \text{ V/cm}$ ，一般会发生雪崩击穿。如图 3(b) 是源/漏极与衬底 P/N 结反偏时，电子电流密度和电子/空穴浓度分布图，在栅极两侧电场峰值处，电子/空穴电流密度增大，电子/空穴运动最为剧烈，电子最可能进入激发态，而发射出光子，即成为光源，此为带有电子和空穴的硅宿主原子电离发光，预测光谱峰值在 650 nm (1.8 eV) 和 550 nm (2.4 eV) [7]。图中结果表明，源/漏极与衬底形成的 P/N 结与传统的 P/N 结 LED 具有相似的发光原理和测试方法，利用雪崩击穿在 CMOS 管上发光的探索成为可能。

### 3. 片上光互连系统

根据应用场合的不同, 光互连可分为片上光互连(单片集成)、片间光互连(同一电路板不同的芯片之间)、板间光互连(不同的电路板之间的互联)和通信设备间光互连。下面主要介绍片上光互连系统。

#### 3.1. 前人在光互连上做的工作

Snyman 等人[8] [9]在 2004 年发表文章, 他们利用  $0.8\ \mu\text{m}$  BiCMOS 实现了硅基光系统集成回路, 如图 4 所示, 包括光发射器件、光波导、光电探测器以及具有高增益的 CMOS 跨阻抗放大器。为了提高光的耦合效率, 使产生的光能充分进入光波导, 将光发射器件和光探测器巧妙地设计成了鸟嘴形状。

电子科技大学 Kaikai Xu 等人[10]在  $0.35\ \mu\text{m}$  CMOS 工艺下设计了利用雪崩击穿作为 LED, 探测共用器件作为 PD, 并利用金属包裹的钝化层作为光波导, 构成光互连系统, 如图 5 所示。该系统在改变 LED 驱动强度时, 能够明显看到 PD 信号跟随其变化。

综上所述, 标准 CMOS 工艺下光互连系统还处于摸索阶段, 发光器件、探测器件的效率和光波导的耦合效率都比较低。目前所报道的互连系统中, 硅光芯片的设计制造从材料、工艺到测试、封装技术等问题都亟待解决。

#### 3.2. CMOS 工艺下光互连电路的探索

本文对 MOS 管组成的光互连系统做了探索性的研究, 如图 6 所示。由于光电可逆性原理, 系统中的光发射器件 LED 和探测器件 PD 的角色可以互换, 此处将 NMOS 作为光源, 光线沿光波导传输至 PMOS 探测器, 使用的光波导是由金属包裹的钝化层, 钝化层使用  $\text{SiO}_2$  或者  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , 具体使用哪一种可以根据实际的工作效果来决定[11]。由结构不难看出, LED 的光线经过氧栅折射和金属反射到达 PD, 光线几乎

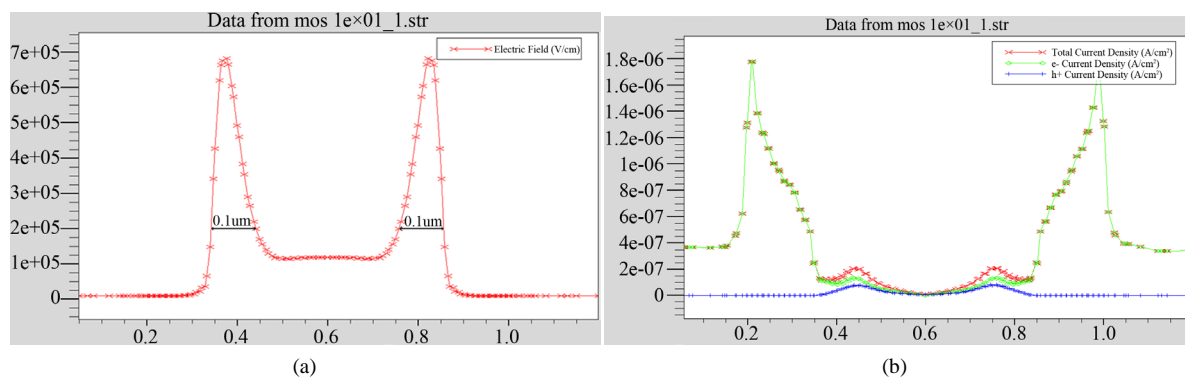


Figure 3. Electrical simulation in the light emitter device; (a) Electric field at the light source; (b)  $e^-$  and  $h^+$  density around light source

图 3. NMOS 发光器件内部电学特性仿真; (a) 光发射器件光源处电场强度; (b) 光源处对应的电子/空穴电流密度

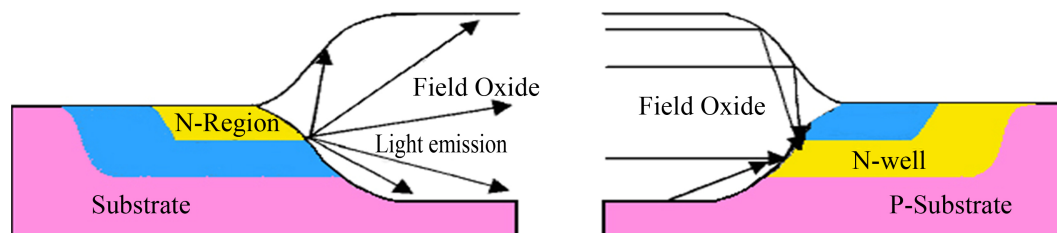


Figure 4. Silicon basis optoelectronic integrated circuit with  $\text{SiO}_2$  waveguide

图 4.  $\text{SiO}_2$  光波导硅基光电子集成电路

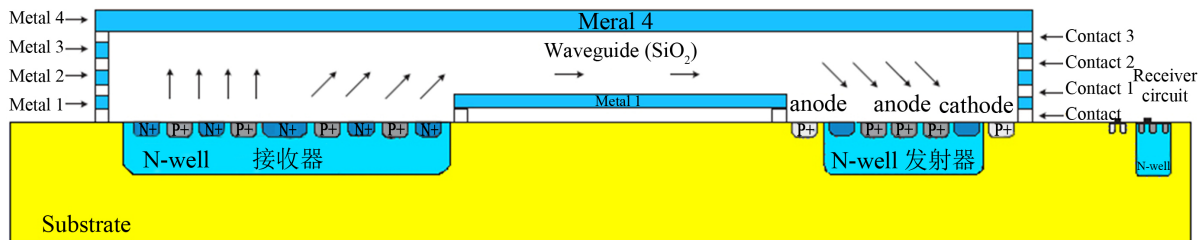


Figure 5. Silicon basis optical interconnection systems designed by Kaikai Xu *et al.*

图 5. Kaikai Xu 等人设计的硅基光互连系统

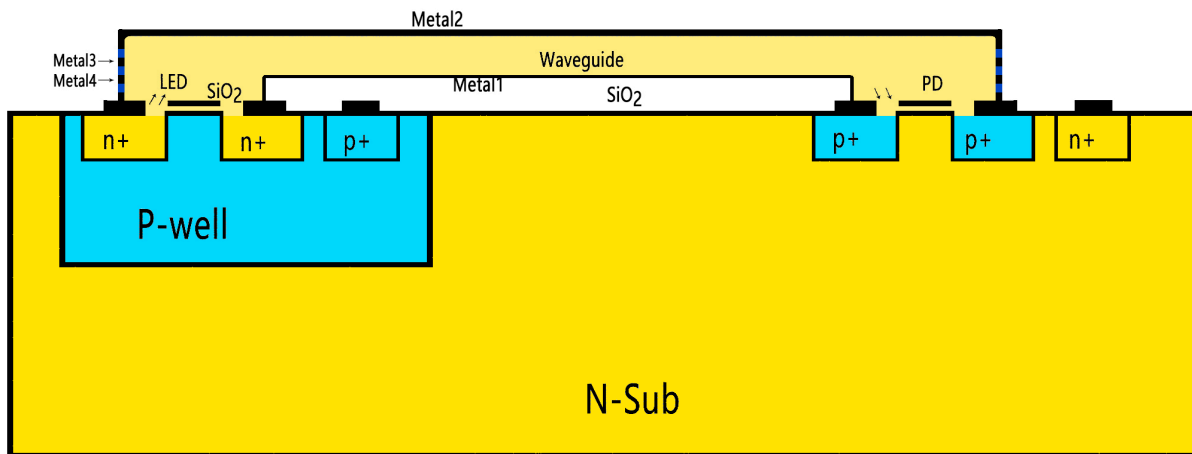


Figure 6. Silicon basis optical interconnection system constituted by MOS Fet and SiO<sub>2</sub> waveguide

图 6. MOS 管和 SiO<sub>2</sub> 光波导构成的硅基光互连系统

没有损耗，提高光传输效率，避免信号串扰。

该结构存在的问题是多晶硅发光和探测器件的效率低。针对该问题，提出一些探索性解决方法：1) 缩短光源和光波导之间的距离；2) 光波导接口平面与光线尽量垂直；3) 在光源与光波导之间通过电场控制高折射率钝化层制成凸透镜，使光线会聚。

## 致 谢

电子科技大学徐开凯教授对器件模型仿真的指导，谨向徐教授表示由衷的感谢。

## 基金项目

这项工作是由新型微纳器件的国防重点学科实验室和系统技术，中国的自然科学基金的开放式基金在合同 61540013 的支持，四川省科学技术基金会在合同 2016JY0217 的支持，开放式的基金电子薄膜与集成器件国家重点实验室下的合同 KFJJ201508 的支持，并科技在模拟集成电路科学技术实验室在合同 9140C090112150C09042 的支持。四川省科技厅 13 年支撑计划，2013GZX0139，高效高可靠 Led 照明系列集成电路的研制。

## 参考文献 (References)

- [1] Goodman, J.W., Leonberger, F.J., Kung, S.Y. and Athale, R.A. (1984) Optical Interconnections for VLSI Systems. *Proceedings of the IEEE*, **72**, 850-866. <http://dx.doi.org/10.1109/PROC.1984.12943>
- [2] 张兴杰, 张世林, 等. 标准 CMOS 工艺新型多晶硅 PIN-LED 的设计与实现[J]. 光电子: 激光, 2013(1): 6-10.
- [3] 韩磊. 硅基发光器件及其构成的光互连系统研究[J]. 发光学报, 2012, 33(4): 444-448.

- [4] Gautam, D.K., Khokle, W.S. and Garg, K.B. (1988) Effect of Absorption on Photon Emission from Reverse-Biased Silicon P-N Junctions. *Solid-State Electron*, **31**, 1119-1121. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-1101\(88\)90415-7](http://dx.doi.org/10.1016/0038-1101(88)90415-7)
- [5] Wolff, P.A. (1960) Theory of Optical Radiation from Breakdown Avalanches in Germanium. *Journal of Physical Chemistry of Solids*, **16**, 184-190. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-3697\(60\)90148-7](http://dx.doi.org/10.1016/0022-3697(60)90148-7)
- [6] Akil, N., Kerns, S.E., Kerns Jr., D.V., Hoffmann, A. and Charles, J.-P. (1999) A Multimechanism Model for Photon Generation by Silicon Junctions in Avalanche Breakdown. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **46**, 1022-1028. <http://dx.doi.org/10.1109/16.760412>
- [7] Snyman, L.W., du Plessis, M., Seevinck, E. and Aharoni, H. (1999) An Efficient Low Voltage, High Frequency Silicon CMOS Light Emitting Device and Electro-Optical Interface. *IEEE Electron Device Letters*, **20**, 614-617. <http://dx.doi.org/10.1109/55.806102>
- [8] Snyman, L.W., *et al.* (2000) Optical Sources, Integrated Optical Detectors and Optical Waveguides in Standard Silicon CMOS Integrated Circuitry. *Symposium on Integrated Optoelectronics*, **3953**, 20-36.
- [9] Plessis, M.D., Aharoni, H. and Snyman, L.W. (2005) Two- and Multi-Terminal CMOS/BiCMOS Si LED's. *Optical Materials*, **27**, 1059-1063. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2004.08.063>
- [10] Xu, K.K. and Huang, B.J. (2015) Silicon Light-Emitting Device in Standard CMOS Technology. *International Photonics & Optoelectronics Meeting*. <http://dx.doi.org/10.1364/oedi.2015.ot1c.3>
- [11] Huang, B.J., Zhang, X., Wang, W., Dong, Z., Guan, N., Zhang, Z. and Chen, H. (2011) CMOS Monolithic Optoelectronic Integrated Circuit for On-Chip Optical Interconnection. *Optics Communications*, **284**, 3924-3927. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2011.04.028>

再次投稿您将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>