

文章编号: 0253-2239(2007)06-1018-5

基于垂直层叠结构的可见/近红外双波段传感器研究*

陈 远 徐之海 冯华君

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 提出了基于垂直层叠结构的双波段传感器,该结构为同时对可见波段和近红外波段进行成像提供了可能。它的基本原理是利用不同波长的光在硅材料中穿透深度的非线性分布,即:短波长的可见光主要在表面被吸收,长波长的近红外光则主要在更深的位置被吸收。通过垂直层叠结构,抽取不同深度的光生载流子,即可以得到相应波段的成像信息。数值仿真分析表明,结构参量为 $D_1 = 2 \mu\text{m}$, $D_2 = 18 \mu\text{m}$ 的结构能在 400~1200 nm 波长范围得到响应峰值波长为 550 nm 和 1000 nm 的最佳可见/近红外响应。

关键词: 成像系统; 多光谱; 可见/近红外; 成像传感器; 垂直层叠结构

中图分类号: TN36 文献标识码: A

Visible/Near IR Double Wave Band Sensor Based on Vertically Stacked Structure

Chen Yuan Xu Zhihai Feng Huajun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: A novel double wave band sensor based on vertically stacked structure is proposed. It provides the possibility to obtain images in visible/near IR spectrum simultaneously. Its basic principle is to use silicon material's differences of penetration depths of electromagnetic waves with different wavelengths, i. e., visible light with short wavelength mainly absorbed at surface while near IR light with longer wavelength mainly absorbed at deeper location. Through extraction of photocarriers at different depths, images corresponding to their spectrums are obtained. The analysis of results from numerical simulation shows that the device with structure parameters of $D_1 = 2 \mu\text{m}$, $D_2 = 18 \mu\text{m}$ give best visible/near-IR response with peak values at 550 nm and 1000 nm in the imaging wavelength of 400~1200 nm.

Key words: imaging system; multispectrum; visible/near IR; image sensor; vertically stacked structure

1 引 言

可见光的波长范围大致在 400~760 nm, 这个波段提供给人们最多也是最为重要的图像信息, 可以说在成像系统中, 它是不可或缺的。近红外波段范围大致在 780~3000 nm, 它在食品, 农业, 医学检测中具有重要意义; 另外, 由于无月夜空的自然微光谱从 300~1300 nm 是急剧上升的, 因此近红外波段成像在军事上也具有十分重要的意义^[1]。

为了消除室外应用时近红外背景波段对可见波段成像衬比度的影响, 日常使用的 CCD 或者互补性金属氧化物半导体(CMOS)成像器件都在成像面之前加装了红外截止滤波片, 因此在一定条件下携带有十分重要信息的近红外波段都被白白浪费了。而在一些探测和识别应用中, 可见光与近红外图像信息都对信息获取具有重要意义, 因此提出了对可见光/近红外共焦面探测器的研究需求。

* 国家自然科学基金(60577047)资助课题。

作者简介: 陈 远(1981-), 男, 浙江宁波人, 博士研究生, 主要从事新型基于垂直层叠结构的图像传感器像素设计方面的研究。E-mail: leohart@126.com

导师简介: 徐之海(1964-), 男, 浙江杭州人, 教授, 博士生导师, 主要从事成像技术与图像工程方面的研究。E-mail: xuzh@zju.edu.cn

收稿日期: 2006-08-09; 收到修改稿日期: 2006-10-08

近年来,随着对垂直层叠结构研究的深入,垂直层叠多通道成像成为彩色成像的一个新潮流^[2~4]。红绿蓝(RGB)三通道成像甚至更多的六通道成像能够提供超越普通基于色彩滤镜阵列(Color filter array, CFA)彩色成像更好的色彩还原和更少的色彩失真,2002 年美国 Foveon 公司推出了基于垂直层叠结构的 X3 CMOS 彩色图像传感器^[5],已经成功地应用在日本 Sigma 公司的数码单反照相机 SD9,SD10 上。本文提出了基于垂直层叠结构的可见/近红外波段双通道传感器,基于此结构的像素阵列能够在一片成像器件上同时得到可见波段和近红外波段的图像,具有十分重要的意义。

2 器件结构和原理

基于垂直层叠结构的多通道传感器的基本原理是利用不同波长的光在硅材料中透射深度的非线性分布,即:短波长可见光主要在近表面被吸收,长波长的近红外光主要在更深的位置被吸收^[7]。具体的吸收长度见图 1。该特性为使用不同深度,不同光学带宽的光电二极管探测入射光的色彩甚至扩展成像光谱至近红外近紫外^[7]提供了可能。由于硅的禁带宽度为 1.12 eV,使用硅的近红外探测器本征极限响应波长约在 1100 nm 左右。如果能够设计出一个结构能够抽取不同深度的光生载流子,那么就可以得到可见/近红外图像。

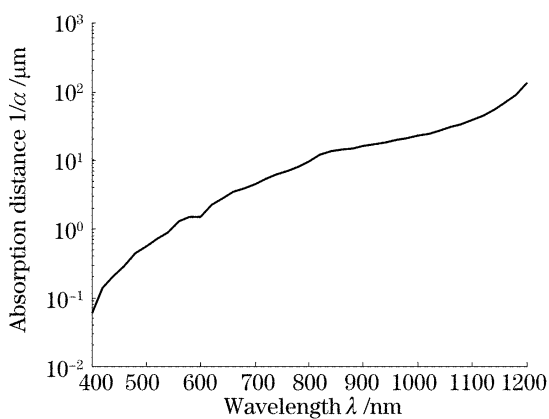


图 1 硅对可见和近红外波段光的吸收长度

Fig. 1 The absorption distance of visible/near-IR light in silicon

图 2 是器件的结构示意图。使用的是 pinip 结构,两层 p⁺ 层的硼掺杂浓度为 1×10¹⁸ cm⁻³,中间的 n⁺ 层的磷掺杂浓度为 1×10¹⁸ cm⁻³,两层本征层 i 实际上是掺杂浓度为 1×10¹⁵ cm⁻³ 的 n⁻ 层。在三层重掺杂层分别引出 Top, Middle, Bottom 三个电极,其中 Top 电极使用了透明导电氧化物(TCO)光

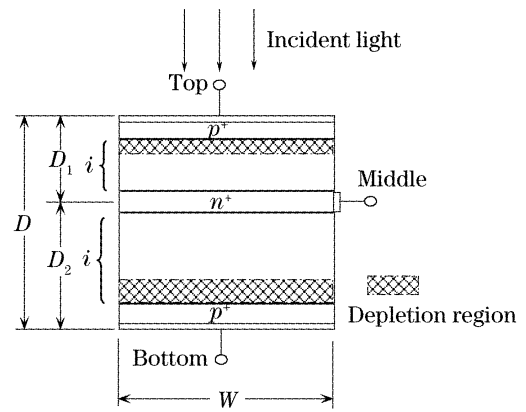


图 2 器件结构剖面示意图

Fig. 2 Schematic cross section of the visible/near-IR sensor 电极。位于上层的 pin 结和位于下层的 nip 结分别用于可见光和近红外光的检出,它们的厚度由两个波段的典型吸收长度决定,大致的范围分别为 1~3 μm 和 7~27 μm^[6]。当在三个电极上施加适当的偏压时,它的耗尽区主要位于 p⁺ i 和 ip⁺ 层界面附近,有助于提高可见光和近红外信号的分离度。

图 3 是沿深度方向的能带结构示意图。由图可见,可见光主要在区域 I 被吸收,在该区域的产生的电子空穴对在电场的作用下分离,位于导带的光生电子流向中间电极,位于价带的光生空穴流向顶部电极;近红外光主要在区域 II 被吸收,光生电子流向中间电极,而光生空穴流向底部电极。通过这个简单的分析可以得到, I_{Top} 主要包含可见波段信息, I_{Bottom} 主要包含近红外波段信息, I_{Middle} 同时包含了两种波段的信息。由基尔霍夫电流定律(KCL), I_{Top} + I_{Bottom} + I_{Middle} = 0, 这 3 个量中只有 2 个是线性独立的,可选择 I_{Top}, I_{Bottom} 进行研究。

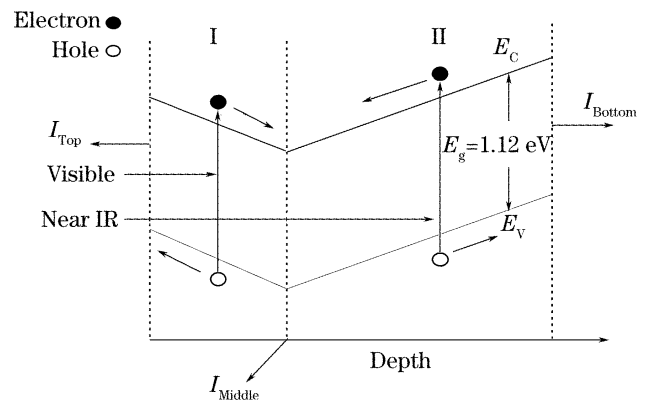


图 3 pinip 结构的深度方向能带示意图

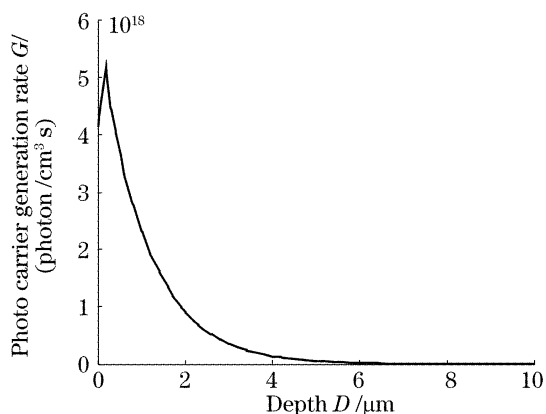
Fig. 3 Schematic diagram of energy band along the depth of the sensor

3 理论分析和结果

对于尺寸在亚微米以上的半导体器件来说,应

用迁移-扩散(Drift-diffusion)电流模型来描述内部载流子输运过程是足够精确的。通过数值方法求解二维电子空穴连续性方程和泊松方程,可以完备地确定被仿真结构的电学特性。在仿真光电器件的情况下,电子空穴的连续性方程中的产生项将包括光生载流子^[8,9]。

模拟的器件结构设置为:光源为 1×10^{15} photon/($\text{cm}^3 \cdot \text{s}$),波长 400~1200 nm,宽度为 10 μm 的垂直入射平行光;器件的宽度 W 设为 20



μm ,厚度 D 为 10~30 μm 。pin 结的厚度 D_1 为 1~3 μm ,nip 结的 D_2 为 7~27 μm ;三个电极偏置电压为 $V_{\text{Top}} = V_{\text{Bottom}} = -3 \text{ V}$, $V_{\text{Middle}} = 0$,具体见图 2。下文中如不作说明,则参量默认为此处给出的值。以上参量都有待通过器件模拟进行优化,以取得最佳器件性能。

图 4 是对 $D_1 = 2 \mu\text{m}$, $D_2 = 8 \mu\text{m}$ 的一个结构在 550 nm 波长照明下,沿深度方向的光生载流子产生率和器件内部的电势分布的模拟结果。

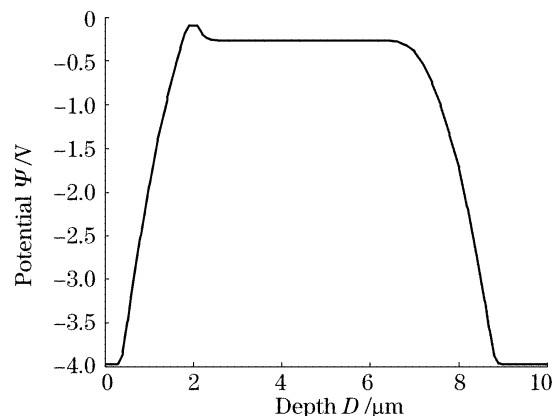


图 4 沿深度方向的光生载流子产生率(a),沿深度方向器件内部的电势分布(b)

Fig. 4 The photocarrier generation rate along the depth (a), potential distribution along the depth (b)

可见光主要在前 pin 结被吸收,该结的厚度将主要决定器件对可见光的光谱响应。研究表明,波长分别为 450 nm,550 nm,650 nm 的蓝绿红三色光在硅材料的透射深度大致为 0.1 μm , 1 μm , 5 μm ^[6],因此 pin 结的厚度应该设置在 1~3 μm 左右以兼顾所有波长的吸收。图 5 为 $D = 10 \mu\text{m}$, $D_1 = 1 \mu\text{m}$, 2 μm , 3 μm 的情况下,器件对可见波段和近红外波段的光谱响应。

可以看到,当 D_1 由 1 μm 变化到 3 μm 的时候,

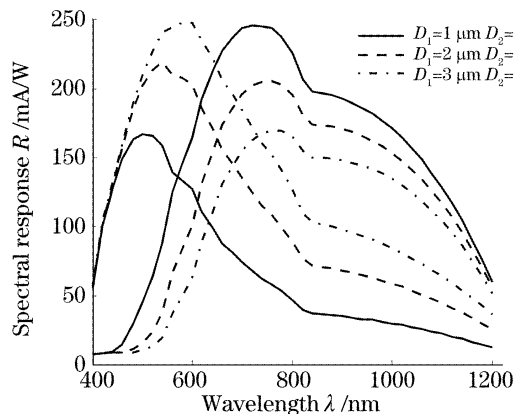


图 5 器件对可见波段和近红外波段的光谱响应 ($D = 10 \mu\text{m}$, $D_1 = 1 \mu\text{m}$, 2 μm , 3 μm)

Fig. 5 Spectral responses of device in visible and near-IR region. The total thickness of device is 10 μm , the thickness of top pin junction varies from 1 μm to 3 μm

可见波段光谱响应明显增强,而近红外波段光谱响应明显减弱。很明显,这是因为总的结长度是固定的,前 pin 结的长度变长以后,吸收能量的比例增大,而后 nip 结吸收能量的比例减小。同时,随着前 pin 结的厚度增大,可见波段响应曲线的峰值位置由 500 nm 变化到 600 nm,但是近红外波段的峰值位置基本没有什么变化。

这可以由硅对光吸收系数的在各波段变化程度来解释:在可见波段,例如上面所说的蓝绿红三色光的透射深度变化了 50 倍,由此改变前 pin 结的厚度将显著影响可见波段响应峰的位置;而在近红外波段,不同波长的光的透射深度变化并不如可见波段那样强烈,例如 900 nm 波长的光透射深度为 16 μm ,1000 nm 波长的光透射深度为 23 μm ,因此近红外波段的光谱响应基本上只有强度上的降低,而无峰值位置的显著变化。

图 6 为前 pin 结厚度 $D_1 = 3 \mu\text{m}$ 的情况下,增加后 nip 结长度,器件的光谱响应曲线;图 7 为前结厚度 $D_1 = 2 \mu\text{m}$ 的对应光谱响应曲线。

图 6 中 $D_1 = 3 \mu\text{m}$ 的结构随着 D_2 厚度的增加,器件的近红外光谱响应峰值位置由 800 nm 增加到了 1000 nm,器件的近红外成像能力得到了大大的加强。由于前结厚度固定不变,可见波段响应曲线

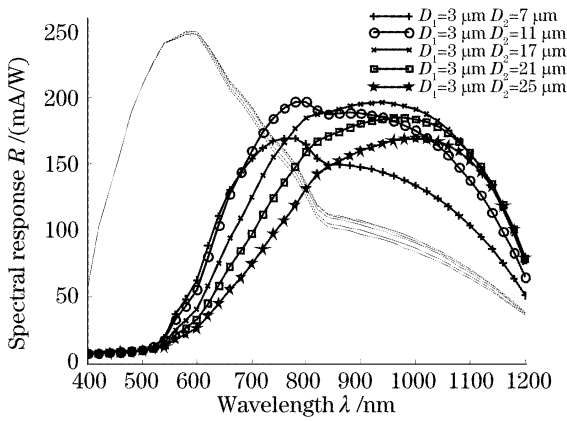


图 6 前 pin 结厚度为 3 μm, 增加后 nip 结厚度情况下的光谱响应

Fig. 6 Spectral responses with increasing bottom nip junction thickness and fixed top pin junction ($D_1 = 3 \mu\text{m}$)

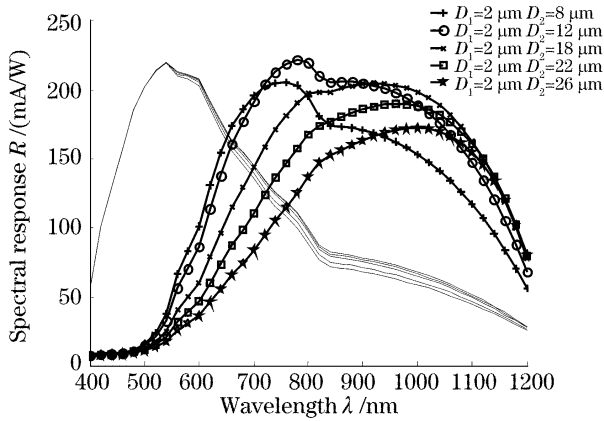


图 7 前 pin 结厚度为 2 μm, 增加后 nip 结厚度情况下的光谱响应

Fig. 7 Spectral responses with increasing bottom nip junction thickness and fixed top pin junction ($D_1 = 2 \mu\text{m}$)

只有细微变化, 可以忽略不计。

图 7 中 $D_1 = 2 \mu\text{m}$ 的结构随着 D_2 厚度的增加, 近红外光谱响应峰值位置同样增加到了 1000 nm, 且响应绝对值得到了更大的增强, 且可见波段和红外波段的响应更为均匀。

我们注意到两种不同结构同时表现出一种特性, 即: 当总结深 $D < 20 \mu\text{m}$ 时, 随着 D_2 的增大, 近红外响应有较大的提高; 但当 $D > 20 \mu\text{m}$ 以后, 随着 D_2 的增大, 近红外响应反而变小了。这个现象的出现验证了上述分析的光生载流子输运理论。由于使用的 pinip 结构, 耗尽区主要存在于 p^+i 和 ip^+ 层界面附近, 而只有产生在耗尽区内的光生载流子才能在较大的电场下被抽出。由于近红外波段对硅较大的透射深度以及具体的光生载流子分布特性, 当 $D < 20 \mu\text{m}$ 时, 位于 ip^+ 层界面附近的耗尽区能随着

D_2 的增大抽取出更多的近红外波段的光生载流子, 但是当 $D > 20 \mu\text{m}$ 以后, 随着 D_2 的增大该耗尽区能够抽取出载流子反而变少了。理论上来说, 如果能够加大后结的偏置电压, 这样可以获得更大的耗尽区, 由此提高近红外区的响应度, 但是实际上使用较大的电压将带来较大的暗电流, 器件的动态范围将严重降低。

实际上普通的 CCD 或者互补性金属氧化物半导体器件对近红外波段也是有一定的感光能力的, 但是一般在应用这些器件的时候都会在它之前放上一片红外截止玻片滤去红外光^[1]。可见/近红外双波段结构自然不能加红外截止玻片, 这将给可见波段成像带来一定的问题。

从上面的光谱响应曲线可以看到, 可见波段响应曲线在红外波段仍有较大的响应, 这样在具有较多近红外分量的照明条件(如晴天室外)下拍摄图像时, 可见光通道图像将具有很大的近红外背景, 图像的衬比度将严重降低。在实际优化中发现, 结构参数的改变对该现象的消除作用不大, 且 $D_2 = 3 \mu\text{m}$ 时影响比 $D_2 = 2 \mu\text{m}$ 时大。

可以通过后期信号处理来减弱这个效应。如果用主要位于近红外波段的红外通道去减可见波通道, 将有效地消除可见波通道中多余的近红外信号。这相当于把两个线性独立的信号进行了一次线性变换, 以提取出更加有用的信息。如图 8, 使用的变换为 $I_{\text{visible}} = I_{\text{top}} - 0.3I_{\text{bottom}}$ 与原先的 I_{Top} 通道相比, 变换后的 I_{visible} 通道可见波段响应虽有所减弱, 但基本可以忽略不计, 而相应的近红外响应已经大大被减弱, 基本不存在上述衬比度降低的问题。

由于利用了垂直层叠结构来分离双波段信号, 不可避免地带来了光斜入射时光谱响应曲线变化的

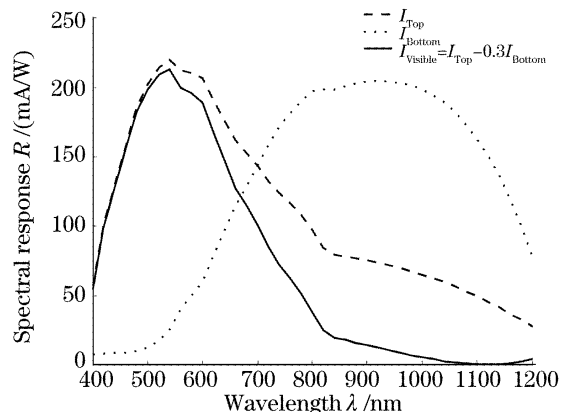


图 8 线性变换前和线性变换后可见波段响应的比较
Fig. 8 Visible spectral response before and after linear transform

问题。因此,当视场角较大时,像面的均匀度将成为一个重要的问题。但是,在被模拟的结构中,填充率(filling factor)为50%,当器件的纵向深度不大大超过横向宽度的时候,斜入射带来的像面响应不均匀基本上可以忽略不计。图9是当入射角为 80° 和 70° 时光谱响应曲线与正入射时的比较,可见光谱响应曲线基本没有变化。

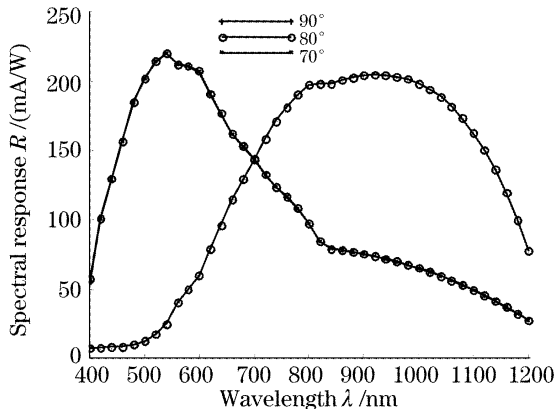


图9 不同角度入射对光谱响应的影响

($D_1=2\ \mu\text{m}$, $D_2=18\ \mu\text{m}$)

Fig. 9 The spectral responses under obliquely incident lights ($D_1=2\ \mu\text{m}$, $D_2=18\ \mu\text{m}$)

由上述数据分析表明,结构参量为 $D_1=2\ \mu\text{m}$, $D_2=18\ \mu\text{m}$ 的结构能在400~1200 nm波长范围得到响应峰值波长为550 nm和1000 nm的最佳可见/近红外响应。

4 结 论

提出了一种基于垂直层叠结构的新型可见/近红外双波段传感器,并应用迁移-扩散(Drift-diffusion)电流模型来描述内部载流子输运过程,通

过联立求解电子空穴连续性方程分析了该器件的光电响应特性。数值分析结果表明,选取结构参量为 $D_1=2\ \mu\text{m}$, $D_2=18\ \mu\text{m}$ 结构加以3 V的偏置电压并辅以信号线性变换手段,能够获得最佳的可见/近红外波段响应信号。同时,在填充率为50%的情况下,该结构对斜入射带来的像面光谱响应不均匀具有很好的抑制作用。由于应用了一定的反向偏置电压,该器件的暗电流水平仍有待降低,动态范围需要提高,一旦这些问题得到解决,基于该结构的成像器件能够同时提供可见/近红外双波段图像,具有很好应用前景。

参 考 文 献

- 1 Xu Zhihai, Li Qi. *Modern Imaging Systems* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001. 169~170 (in Chinese)
徐之海,李奇. 现代成像系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001. 169~170
- 2 D. Knipp, H. Stiebig, H. Wagner. Thin film color sensors in multi-channel technology[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4306**: 156~157
- 3 D. Knipp, R. A. Street, H. Stiebig *et al.*. Vertically integrated thin film color sensor arrays for imaging applications[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(8): 3106~3113
- 4 S. Mohajerzadeh, A. Nathan, C. R. Selvakumar. Numerical simulation of a p-n-p-n color sensor for simultaneous color detection[J]. *Sensors and Actuators A*, 1994, **44**(2): 119~124
- 5 David L. Gilblom, Sang Keun Yoo, Peter Ventura. Real-time color imaging with a CMOS sensor having stacked photodiodes [C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5210**: 105~115
- 6 E. D. Palik. *Handbook of Optical Constants of Solids* [M]. New York: Academic Press, 1985
- 7 David L. Gilblom, Sang Keun Yoo. Infrared and ultraviolet imaging with a CMOS sensor having layered photodiodes [C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5301**: 186~192
- 8 Mamoru Kurata. *Numerical Analysis for Semiconductor Devices* [M]. Lexington: D. C. Heath and Company, 1982. 13~14
- 9 Siegfried Selberherr. *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices* [M]. New York: Springer, 1984. 10~11