

SOI 基栅控横向 PIN 蓝紫光探测器温度特性研究

谢海情¹, 贾新亮¹, 黄茂飞², 李洁颖¹, 彭永达¹, 王超¹, 王龙¹

(1. 长沙理工大学 物理与电子科学学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南电子科技职业学院 机械与电子信息工程学院, 湖南 长沙 410217)

摘要:通过模型构建、数值计算和软件模拟,对绝缘衬底上的硅(SOI)基栅控横向 P-I-N(通用结构)蓝紫光探测器在 $-25\sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的电流-电压(I - V)特性进行研究。构建温度对栅极电压影响的解析模型,通过数值计算与软件模拟,验证模型的有效性。利用 SILVACO 软件中的 ATLAS 模块对不同温度下的沟道表面电子浓度、光电流、暗电流、信噪比(SNR)等特性进行模拟仿真。结果表明,沟道表面电子浓度和暗电流随温度的升高而增大,温度对光电流的影响不明显,信噪比随温度的升高而减小,在温度 $T = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 栅极电压为 1.44 V 时, SNR 达到最大值 6.11×10^5 ; 在 $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$, 栅极电压为 2 V 时, SNR 达到最小值为 1.064×10^3 。

关键词:温度特性; 信噪比; 栅极电压; 光探测器

中图分类号: TN36; TM21

文献标识码: A

DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2019.01.019

Study on Temperature Characteristics of SOI-based Grating Controlled Lateral PIN Blue/Violet Photodetector

XIE Haiqing¹, JIA Xinliang¹, HUANG Maofei², LI Jieying¹, PENG Yongda¹, WANG Chao¹, WANG Long¹

(1. School of Physics & Electronic Science, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Hunan Vocational College of Electronic and Technology, Changsha 410217, China)

Abstract: The current-voltage (I - V) characteristics of the SOI-based grating controlled lateral PIN blue/violet photodetector at $-25\sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ were studied by model establish, numerical calculation and software simulation. The analytical model of the effect of temperature on the gate voltage has been established and validity of the model is verified by the numerical calculation and software simulation. The electron concentration on the surface of channel, photo current, dark current and SNR is simulated by ATLAS module in SILVACO software. The results show that the electron concentration on the surface of channel and dark current increase with the rise of temperature, the effect of temperature on the photocurrent is not obvious, and the SNR decreases with the increase of temperature. The SNR reaches a maximum value of 6.11×10^5 when the temperature is $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the gate voltage is 1.44 V, while falls to a minimum value of 1.064×10^3 when the temperature is $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the gate voltage is 2 V.

Key words: temperature characteristics; SNR; gate voltage; photodetector

0 引言

光探测器(PD)作为光信号读取器件,在光电子系统中起着关键的作用。蓝紫光探测器在蓝光存储、医疗卫生、环境监测等领域应用广泛^[1]。随着 CMOS 工艺的发展,与 CMOS 工艺兼容的高性能、可光电集成的蓝紫光探测器成为目前的一个研究热点。

基于体硅 CMOS 工艺的光探测器都存在衬底漏电流和暗电流大及灵敏度低等缺陷。绝缘衬底上的硅(SOI)薄膜器件是在绝缘层上的半导体薄膜中制造器件,具有漏电流小,寄生电容小,无闩锁效应等优点,受到国内外研究者的高度重视,被视为 21

世纪的微电子技术。韩志涛等提出的 SOI 薄膜蓝紫光探测器,在 450 nm 波长时,响应度为 0.348 A/W。在波长为 900 nm 时,响应度仅为 0.054 A/W,能有效抑制长波光^[2]。J. Chu 等提出的 SOI 薄膜纵向 PN 结光电二极管,在波长为 480 nm 时,量子效率为 69.6%^[3]。但纵向 PN 结的输入阻抗小,不利于光电集成(OEIC)^[4]。另外,暗电流、量子效率和频率响应之间的矛盾制约了光探测器性能的提高^[5-6]。

谢海情等综合双极型光探测器、MOS 光探测器和 SOI 薄膜器件的优点,提出基于 SOI 薄膜的透明

收稿日期:2018-03-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61404011);湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ3001);湖南省教育厅基金资助科研项目(17B007)

作者简介:谢海情(1982-),男,湖南来阳人,副教授,博士生,主要从事光电集成电路与系统设计的研究。E-mail: xhq_108@163.com。通信作者:贾新亮(1992-),男,硕士生,主要从事微光电器件与光传感器的研究。

电极栅控横向 PIN 光电二极管(LPIN PD-GTE)结构,能有效解决暗电流、量子效率和频率响应之间的矛盾,实现低暗电流、大量子效率和快频率响应,并获得大输入阻抗。在波长为 400 nm 时,暗电流达到皮安量级,响应度大于 0.2 A/W,量子效率大于 70%,−3 dB 带宽为接近 1 GHz^[7-9]。

温度特性是光探测器的一个重要参数指标,其决定了光探测器正常工作的温度范围。温度的改变直接决定硅薄膜的本征载流子浓度和费米势,进而影响 LPIN PD-GTE 栅极电压的栅控作用,从而影响光探测器的光、暗电流,信噪比等光电特性。本文在前期研究工作的基础上,构建不同温度下栅极电压的解析模型,通过数值计算和软件模拟,验证模型的有效性。并进一步研究不同温度时 LPIN PD-GTE 的光、暗电流和信噪比(SNR),探索温度对器件光电特性的影响规律。

1 器件结构与模型构建

本文研究的基于全耗尽 SOI 薄膜的 LPIN PD-GTE 结构如图 1 所示,其中,K 为阳极,G 为栅极,A 为阴极;Si 薄膜厚度 $d_{\text{Si}}=300$ nm, P^- 区长度 $L_i=20$ μm ,掺杂体积浓度 $N_A=10^{15}/\text{cm}^3$; P^+ 和 N^+ 区的长为 2 μm ,掺杂浓度 N_d 均为 $10^{20}/\text{cm}^3$ 。埋氧层厚度 $d_{\text{box}}=380$ nm,沟道上方氧化层厚度 $d_{\text{tox}}=10$ nm,衬底 Si 厚度 $d_{\text{sub}}=580$ nm。

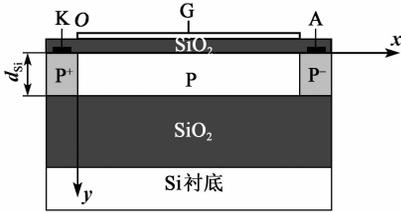


图 1 LPIN PD-GTE 结构图

前期研究工作构建的栅极电压解析模型为

$$V_{\text{GK}} = \varphi_{\text{msf}} + \left(1 + \frac{C_{\text{Si}}}{C_{\text{ox}}}\right) \varphi_{\text{sf}} - \frac{Q_{\text{oxf}}}{C_{\text{ox}}} - \frac{Q_{\text{dep}}}{2C_{\text{ox}}} - \frac{C_{\text{Si}}}{C_{\text{ox}}} \left(-\frac{C_{\text{box}}}{C_{\text{box}} + C_{\text{Si}}}\right) \cdot \left(\varphi_{\text{msb}} - \frac{Q_{\text{oxb}}}{C_{\text{box}}} - \frac{C_{\text{Si}}}{C_{\text{box}}} \varphi_{\text{sf}} - \frac{Q_{\text{dep}}}{2C_{\text{box}}}\right) \quad (1)$$

式中: V_{GK} 为电极 G、K 之间的电压; φ_{msf} 、 φ_{msb} 分别为硅膜正面和背面接触电势差; φ_{sf} 为表面势; Q_{oxf} 、 Q_{oxb} 分别为前、后 SiO_2 层中的单位电荷量; Q_{dep} 为耗尽区的电荷量; C_{Si} 、 C_{ox} 、 C_{box} 分别为硅及前、背栅 SiO_2 的单位电容。

在 LPIN PD-GTE 中,栅极电压控制硅薄膜耗尽而不反型,即 φ_{sf} 的范围为

$$\varphi_{\text{fp}} \leq \varphi_{\text{sf}} \leq 2\varphi_{\text{fp}} \quad (2)$$

式中 φ_{fp} 为硅薄膜的费米势,即

$$\varphi_{\text{fp}} = \frac{E_i - E_F}{q} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (3)$$

式中: E_i 为本征能级; E_F 为费米能级; k 为玻尔兹曼常数; T 为温度; n_i 为本征载流子浓度,其随温度变化的表达式为

$$n_i = 3.39 \times 10^{15} T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g(0)}{2k_0 T}\right) \cdot \exp\left[\frac{\alpha T}{2k_0(T + \beta)}\right] \quad (4)$$

式中: $E_g(0)$ 为 $T=0$ 时的禁带宽度; $\alpha=4.73 \times 10^{-4}$ eV/K, $\beta=636$ K 均为常数。

将式(4)代入式(3)可得 φ_{fp} 随温度变化的解析式为

$$\varphi_{\text{fp}} = \frac{kT}{q} \ln N_A + \frac{E_g(0)}{2q} - \frac{kT}{q} \ln(3.39 \times 10^{15} T^{3/2}) - \frac{\alpha T^2}{2q(T + \beta)} \quad (5)$$

φ_{fp} 对 T 求导,可得

$$\frac{\partial \varphi_{\text{fp}}}{\partial T} = \frac{k}{q} \ln N_A - \frac{k}{q} \ln(3.39 \times 10^{15} T^{3/2}) - \frac{3k}{2q} - \frac{\alpha}{2q} \left[1 - \frac{\beta^2}{(T + \beta)^2}\right] \quad (6)$$

式中 $N_A=10^{15}/\text{cm}^3$, $\beta>0$,所以 $\frac{\partial \varphi_{\text{fp}}}{\partial T} < 0$ 。由此可知, φ_{fp} 随温度的增大而减小。

从式(1)、(3)可得不同温度下栅极电压的解析模型,当沟道表面弱反型时,即 $\varphi_{\text{sf}} = \varphi_{\text{fp}}$,则有

$$V_{\text{GK}} = \varphi_{\text{msf}} + \left[1 + \frac{C_{\text{Si}}}{C_{\text{ox}}} - \frac{C_{\text{Si}}^2}{C_{\text{ox}}(C_{\text{box}} + C_{\text{Si}})}\right] \varphi_{\text{fp}} - \frac{Q_{\text{oxf}}}{C_{\text{ox}}} - \frac{Q_{\text{dep}}}{2C_{\text{ox}}} - \frac{C_{\text{Si}}}{C_{\text{ox}}} \left(-\frac{C_{\text{box}}}{C_{\text{box}} + C_{\text{Si}}}\right) \cdot \left(\varphi_{\text{msb}} - \frac{Q_{\text{oxb}}}{C_{\text{box}}} - \frac{Q_{\text{dep}}}{2C_{\text{box}}}\right) \quad (7)$$

当沟道表面强反型时,即 $\varphi_{\text{sf}} = 2\varphi_{\text{fp}}$,则有

$$V_{\text{GK}} = \varphi_{\text{msf}} + 2 \left[1 + \frac{C_{\text{Si}}}{C_{\text{ox}}} - \frac{C_{\text{Si}}^2}{C_{\text{ox}}(C_{\text{box}} + C_{\text{Si}})}\right] \varphi_{\text{fp}} - \frac{Q_{\text{oxf}}}{C_{\text{ox}}} - \frac{Q_{\text{dep}}}{2C_{\text{ox}}} - \frac{C_{\text{Si}}}{C_{\text{ox}}} \left(-\frac{C_{\text{box}}}{C_{\text{box}} + C_{\text{Si}}}\right) \cdot \left(\varphi_{\text{msb}} - \frac{Q_{\text{oxb}}}{C_{\text{box}}} - \frac{Q_{\text{dep}}}{2C_{\text{box}}}\right) \quad (8)$$

2 结果与分析

采用 MATLAB 对解析模型进行数值计算,并采用 SILVACO 软件中的 ATLAS 模块对器件进行模拟仿真,验证模型的有效性。在此基础上,对器件

的温度特性进行仿真,得到器件光电特性最优化的温度值。

当分别取-25℃、0、25℃、50℃、75℃温度值时,根据式(7)、(8)计算可得,沟道表面弱反型时的栅极电压分别为0.2595V、0.2343V、0.2086V、0.1826V、0.1562V;沟道表面强反型时的栅极电压分别为0.6005V、0.5501V、0.4988V、0.4468V、0.394V。采用ATLAS软件进行模拟仿真,结果如图2、3所示。由图2、3可知,沟道表面弱反型时的栅极电压分别为0.248V、0.246V、0.245V、0.243V、0.242V;沟道表面强反型时的栅极电压分别为0.62V、0.59V、0.56V、0.53V、0.5V。

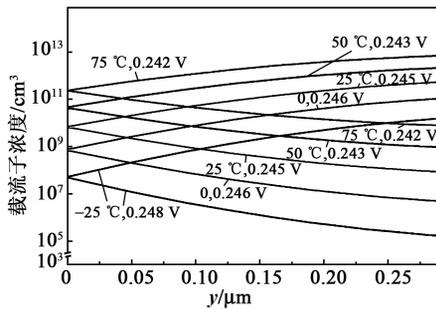


图2 不同温度下,表面弱反型时的纵向载流子浓度分布

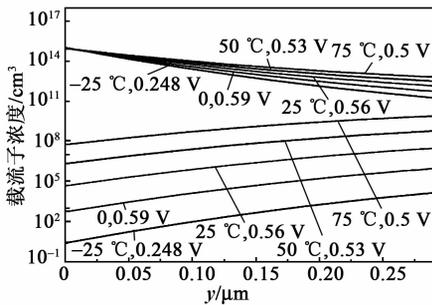


图3 不同温度下,表面强反型时的纵向载流子浓度分布

图4为弱、强反型时的仿真结果和计算结果的栅极电压值的对比图。

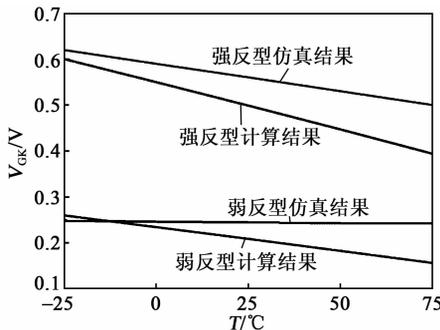


图4 计算结果与仿真结果的对比

通过图4中计算结果与仿真结果的对比可知,当温度上升时,强、弱反型所需的栅极电压值均减小。当温度较低时,计算结果与仿真结果拟合较好,

当温度升高时,栅极电压的计算结果下降幅度比仿真结果大,这是由于在解析模型中忽略了背栅的影响。

当入射光波长为400nm,强度为1mW/cm²,反向偏压为1V时,栅极电压为0~2V,温度由-25℃上升到75℃,采用ATLAS软件对器件温度特性进行模拟仿真。

图5为器件沟道表面处本征载流子浓度随温度的变化曲线。当温度升高时,电子共有化运动加剧,能级分裂加剧,因此,允带变宽,禁带变窄,电子更易从价带跃迁到导带,所以本征载流子浓度随温度的升高而增大。

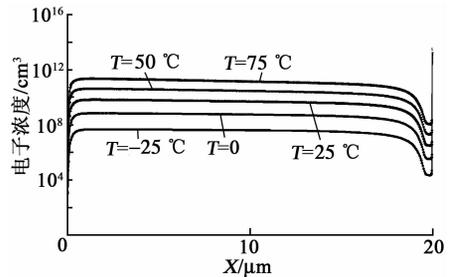


图5 不同温度下,沟道表面本征电子浓度

图6、7分别为LPIN PD-GTE器件的暗电流与光电流随温度的变化曲线。由图可知,暗电流随温度的升高而增大,而光电流的最大值随温度的变化不明显。

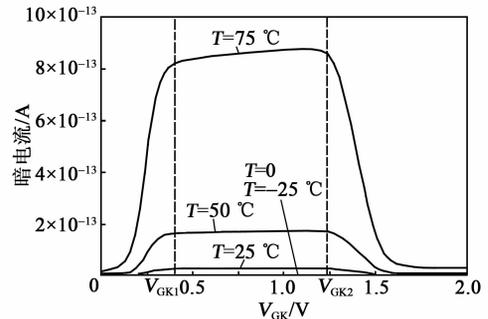


图6 暗电流随温度的变化曲线

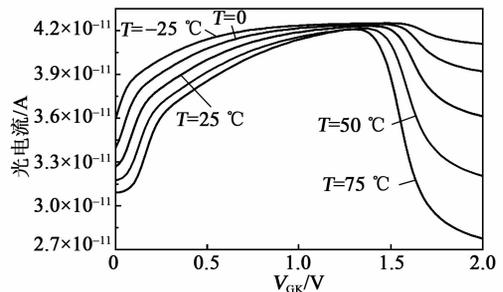


图7 光电流随温度的变化曲线

由图6可知,栅极电压对沟道中载流子浓度的控制分3个阶段。当V_GK < V_GK1时,栅极电压控制沟道中载流子浓度增大,而在沟道右侧PN结处,由

于横向偏压 V_{AK} (电极 A、K 之间的反向电压)使 PN 结与耗尽区交界处电子浓度几乎不变,因此,电子浓度梯度增大,电流增加;当 $V_{GK1} < V_{GK} < V_{GK2}$ 时,沟道表面开始反型, V_{AK} 在左侧高低结处的分压增大,栅极电压与沟道电势差值几乎保持不变,栅压对沟道中载流子浓度失去控制作用,因此,沟道载流子浓度和电流几乎不变;当 $V_{GK} > V_{GK2}$ 时,沟道表面处 V_{AK} 全部转移到左侧高低结处,随着栅极电压的增大,转移点沿沟道纵向延伸,右侧产生的反向抽取越来越弱,浓度梯度减小,因此电流急剧下降。随着温度的上升,本征载流子浓度增大,故暗电流随着温度

的升高而增大。

由图 7 可知,有入射光时,沟道中的载流子主要为光生载流子。温度升高时,沟道中的热激发少数载流子浓度增大,但仍远小于光生载流子浓度。随着热激发多数载流子浓度增大,复合率增大,电子寿命减小,所以光电流稍微减小。另外,随着温度上升,使沟道强反型时所需栅极电压值减小,所以使电流达到最大值的栅极电压值随温度的上升而减小。

SNR 是体现光探测器灵敏度的重要参数。根据图 6、7 可得光、暗电流及 SNR 随温度变化,如表 1 所示。

表 1 光、暗电流及 SNR 随温度变化

温度/℃	光电流最大值及栅极电压		暗电流最大值及栅极电压		光暗比最大值及栅极电压	
	光电流/A	栅极电压/V	暗电流/A	栅极电压/V	SNR	栅极电压/V
-25	4.25×10^{-11}	1.48	1.67×10^{-16}	1.20	6.110×10^5	1.44
0	4.24×10^{-11}	1.44	2.91×10^{-15}	1.18	7.390×10^4	1.50
25	4.23×10^{-11}	1.40	2.63×10^{-14}	1.16	6.700×10^3	1.96
50	4.21×10^{-11}	1.36	1.73×10^{-13}	1.14	7.820×10^3	1.98
75	4.20×10^{-11}	1.30	8.77×10^{-13}	1.12	1.064×10^3	2.00

由表 1 可知,随着温度的增大,光电流的最大值几乎无变化,而暗电流增大明显。SNR 随着温度的升高迅速减小,且达到峰值的栅极电压值也有明显增大。在温度为 $-25\text{ }^\circ\text{C}$ 、栅极电压为 1.44 V 时,SNR 达到最大值。

3 结束语

本文研究了温度变化对 SOI 基栅控横向 PIN 蓝紫光探测器光电特性的影响。构建栅极电压在温度影响下的解析模型,并验证模型的有效性;利用 SILVACO 软件中的 ATLAS 模块对器件的温度特性进行研究,得到本征载流子浓度,光、暗电流及信噪比等随温度的变化规律。结果表明,本征载流子浓度和暗电流随温度的升高而增大,温度对光电流的影响不明显,信噪比随温度的升高而减小。同一温度下,SNR 随栅极电压的增大先减小后不变然后增大,直到达到最大值,而后迅速减小。在 $T=-25\text{ }^\circ\text{C}$, $V_{GK}=1.44\text{ V}$ 时,信噪比达到最大值(为 6.11×10^5),在 $T=75\text{ }^\circ\text{C}$, $V_{GK}=2\text{ V}$ 时下降为 1.064×10^3 。

参考文献:

[1] YOUNG J S, LEE M J, PARK K Y, et al. 10 Gb/s 850 nm CMOS OEIC receiver with a silicon avalanche photodetector[J]. IEEE J Quantum Elect, 2012, 48(2): 229-236.

[2] HAN Z T, CHU J K, MENG F T, et al. Design and simulation of blue/violet sensitive photodetectors in

silicon-on-insulator [J]. Journal of Semiconductors, 2009, 30(10): 104008-1-4.

- [3] CHU J, HAN Z, MENG F, et al. Spectral response of blue-sensitive Si photodetectors in SOI[J]. Sol St Electr, 2011, 55(1): 54-58.
- [4] ISMAIL R A, HAMOUDI W K. Characteristics of novel silicon PIN photodiode made by rapid thermal diffusion technique[J]. J Electron Dev, 2012, 14: 1104-1107.
- [5] SOUZA M D, BULTEEL O, FLANDRE D, et al. Analysis of lateral SOI PIN diodes for the detection of blue and UV wavelengths in a wide temperature range[J]. ECS Trans, 2010, 31(1): 199-206.
- [6] ZENS T, HU J J, BECLA P, et al. Monolithically integrated, resonant-cavity-enhanced dual-band mid-infrared photodetector on silicon[J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(21): 211106-1-3.
- [7] XIE H Q, ZENG Y, ZENG J P, et al. Analysis and simulation of lateral PIN photodiode gated by transparent electrode fabricated on fully-depleted SOI film[J]. J Cent South Univ T, 2011, 18(3): 744-748.
- [8] XIE H Q, TANG L J, TANG J L, et al. High quantum-efficiency in lateral PIN photodiode gated by transparent electrode fabricated on SOI film[J]. Optoelectron Adv Mat, 2014, 8(1/2): 77-82.
- [9] XIE Haiqing, TANG Lijun, TANG Junlong, et al. Study on frequency characteristics in lateral pin photodiode gated by transparent electrode fabricated on fully-depleted silicon-on-insulator film[J]. J Nanoelectron Optoelectron, 2014, 9(1): 62-66.