

激光与光电子学进展

光腔衰荡法测量硅片掺杂特性的仿真和实验研究

魏晨阳, 王谦, 侯宏录*

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 光腔衰荡法对腔内介质吸收有着极高的测量灵敏度,可实现腔损耗的精确测量。本文基于自由载流子吸收理论和谐振腔理论,建立了半导体材料特性测量的光腔衰荡理论模型,推导了腔衰荡信号与半导体材料特性参数和光学谐振腔结构参数间的函数关系,并进行了仿真分析和实验验证。仿真结果表明:光腔衰荡法可以实现半导体材料特性的精确测量,如掺杂浓度和电阻率。同时,基于该技术对半导体单晶硅片掺杂浓度和电阻率进行了实验测量,结果分别为 $(2.65 \pm 0.38) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 和 $(0.61 \pm 0.07) \Omega \cdot \text{cm}$,说明该方法在半导体材料特性测量中具有很好的应用潜力。

关键词 仪器;测量与计量;光学谐振器;半导体材料;激光器;掺杂浓度

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212833

Simulation and Experimental Study of Doping Properties of a Silicon Wafer Using Optical Cavity Ring-Down Measurement Method

Wei Chenyang, Wang Qian, Hou Honglu*

School of Optoelectronic and Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract The cavity ring-down method has an extremely high measurement sensitivity to the absorption of a medium in the cavity and can be used to accurately measure cavity loss. Based on the theories of free carrier absorption and resonant cavity, this study establishes a theoretical model of an optical cavity ring-down to measure the properties of semiconductor materials and derives the functional relationship among the cavity ring-down signal, semiconductor material characteristic parameters, and cavity structure parameters. Simulation analysis and experimental verification are performed. Simulation results show that the cavity ring-down method can be used to accurately measure semiconductor material properties, such as doping concentration and resistivity. Meanwhile, based on the proposed method, the doping concentration and resistivity of a crystalline silicon wafer are determined experimentally to be $(2.65 \pm 0.38) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ and $(0.61 \pm 0.07) \Omega \cdot \text{cm}$ respectively, exhibiting the high application potential of this method for measuring semiconductor material properties.

Key words instruments, measurement and metrology; optical resonators; semiconductor materials; lasers; doping concentration

1 引言

半导体材料是电子工业的基础,为微电子、光电子和光伏能源等领域提供了广泛的原材料,半导体的掺杂特性^[1]对半导体器件的性能有较大影响,因此半导体材料掺杂浓度的精确检测尤为重要。半导体材料表征技术按其测量方式可分为接触式和非接触式两种。

目前主要采用传统的接触式测量方法来表征半导体掺杂浓度,尽管测量精度较高,但是对材料本身具有

一定的破坏性,包括四探针法^[2]、二次离子质谱法和扩散电阻法^[3]等。非接触式测量方法主要为光学检测方法,其无损检测特性弥补了传统方法的不足,如光电导衰减(PCD)技术^[4]、光载流子辐射(PCR)技术^[5-7]、光致发光(PL)技术^[8-10]等。其中,Sun等^[5]和Song等^[6]通过研究PCR信号的功率非线性特性,对硅片的掺杂浓度进行了测量。Wang等^[7]建立了光子重吸收的理论模型,通过测量不同样品表面的PCR信号得到样品的掺杂浓度,分析了结果的不确定性和PCR技术在实验测量中的局限性。Giesecke等^[10]提出采用动态或准稳态

收稿日期: 2021-10-29; 修回日期: 2021-12-09; 录用日期: 2021-12-13; 网络首发日期: 2021-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(61704132)、陕西省自然科学基金基础研究项目(2020JQ-815)

通信作者: hlhou@sina.com

PL 技术测量硅片掺杂浓度,结合净掺杂浓度测量和电阻率测量进一步得到载流子^[11]的迁移率。通过测量不同条件下的载流子输运特性进而可以探索材料缺陷^[12]。然而,上述几种方法均在一定程度上进行了近似处理,从而限制了测量结果的精度。

光腔衰荡(CRD)技术具有极高的测量灵敏度和精度,被广泛应用于高反射率测量和吸收光谱检测等领域。国外学者对 CRD 技术的研究主要在于提高反射率测量精度^[13],近几年将研究重点转向光谱吸收测量方面,测量对象主要为痕量气体^[14-16]、固体薄膜^[17]等。其中,Zhou 等^[14]运用中红外腔衰荡光谱技术采用连续波量子级联激光器对 NO 进行吸收光谱分析,通过确定最优压力提高了测量灵敏度,证明了 CRD 技术在健康诊断方面的应用潜能。Cassar 等^[15]提出了一种高分辨率、高精确性的测量方法,通过对乙烯的吸收光谱监测进行 N₂ 的固定。Sanders 等^[16]提出了一种高灵敏度、较大动态范围的腔增强技术,利用单个脉冲激光束对同一样品进行激光诱导荧光和 CRD 方法测量,通过分析苯的电子光谱发现运用组合测量能够提供较大的动态范围。近年来,国内学者对高反射率测量技术进行了深入研究,分析了光学元件失调^[18]、腔失调、探测器孔径和响应特性^[19-20]等对测量精度的影响,同时对吸收光谱检测^[21]和腔损耗测量也进行了相关研究。杜星湖^[22]提出采用 V 型腔结构,解决了测量过程中由于腔结构^[23]的转换会引入误差的问题。薛颖^[24]针对腔结构转换导致的腔参数相对失调问题,改进调控方法,提升调控效率,实现了快速精密调控的目标。Liu 等^[25]通过将全内反射结构引入光腔以增强表面等离子体共振传感器的性能。

研究发现,CRD 法对腔内介质吸收损耗反应灵敏,结合自由载流子吸收理论可进一步将该方法应用于半导体材料的研究,但其在半导体材料特性测量中的应用却十分有限。为了解决上述问题,本文建立了用于测量半导体材料掺杂特性的 CRD 理论模型,综合分析了谐振腔参数和样品参数对信号的影响,并进行了实验测量验证。

2 理论建模

图 1 给出了 CRD 技术测量半导体材料特性的原理示意图。被测半导体材料 S 垂直放置于光学谐振腔中,光学谐振腔由腔镜 M1 和 M2 组成,由于腔镜的内

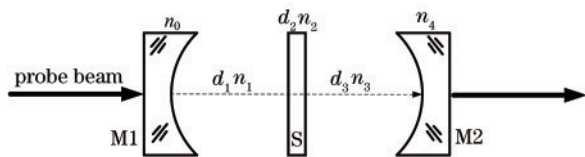


图 1 含半导体材料的 CRD 法测量原理图

Fig. 1 Measuring principle diagram of cavity ring-down (CRD) method containing semiconductor materials

表面均镀有高反射薄膜,可以认为是介质折射率 n_0 和 n_4 很大的半无限厚镜片,且 $n_0 = n_4$ 。三重耦合腔的长度分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 ,介质折射率分别为 n_1 、 n_2 、 n_3 ,其中 $n_1 = n_3 = 1$ 。

为了解决光学系统中的传输问题,可以将其看成是一束光从 n_0 介质入射到镀有三层介质膜的 M2 基底上的光场传输过程。假定入射探测光束是由波长为 λ 的单色相干光源产生,探测光束耦合进光学谐振腔后,在谐振腔的前后两个腔镜内表面和样品前后表面经过多次反射和透射,经过腔镜 M2 的透射光经聚焦透镜聚焦后由光电探测器接收,其出射电场总振幅为多次出射电场振幅的叠加。

轴对称光学系统可用一个 2×2 矩阵来描述其光束变换关系,令光束传输的特征矩阵为 \mathbf{M} ,谐振腔的入射面和出射面的电场 E 和磁场 H 关于特征矩阵 \mathbf{M} 的关系为

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} E_4 \\ H_4 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

根据相应界面内电场 E 和磁场 H 的关系:

$$\begin{cases} H_0 = Y E_0 \\ H_4 = \eta_4 E_4 \end{cases}, \quad (2)$$

式中, Y 是膜层和基底的组合导纳,式(1)可以写成关于电场 E 的矩阵关系:

$$E_0 \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_4 \end{bmatrix} E_4, \quad (3)$$

令

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_4 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

加入样品的谐振腔系统的特征矩阵为^[26]

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i}{\eta_1} \sin \delta_1 \\ i\eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_2 & \frac{i}{\eta_2} \sin \delta_2 \\ i\eta_2 \sin \delta_2 & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_3 & \frac{i}{\eta_3} \sin \delta_3 \\ i\eta_3 \sin \delta_3 & \cos \delta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_4 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: $\eta_0 = \eta_4 = n_0$; $\eta_2 = n_2 - ik$; $\eta_1 = \eta_3 = 1$; $\delta_1 = 2\pi d_1/\lambda$; $\delta_2 = 2\pi d_2(n_2 - ik)/\lambda$; $\delta_3 = 2\pi d_3/\lambda$; k 为被测样品的消光系数。式(5)等号右侧的矩阵表达式分别为插入样品后光束经过的第一个空气介质层、样品介质层和第二个空气介质层的特征矩阵。

由于多层膜和基片的组合导纳 $Y = C/B$, 振幅反射系数为

$$r = \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y}, \quad (6)$$

膜系的反射率为

$$R = r \cdot r^* = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^*. \quad (7)$$

因此加入样品后,谐振腔对于探测光束的透过率可表示为^[27]

$$T = (1 - R) \frac{\eta_4}{\text{Re}(BC^*)} = \frac{4\eta_0\eta_4}{(\eta_0B + C)(\eta_0B + C)^*} \quad (8)$$

当谐振腔为空腔,即无样品插入时,式(5)可以简化为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i}{\eta_1} \sin \delta_1 \\ i\eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_3 & \frac{i}{\eta_3} \sin \delta_3 \\ i\eta_3 \sin \delta_3 & \cos \delta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_4 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)得到空腔时探测光束的透过率为

$$T = \frac{(1 - R)^2}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2 \delta}, \quad (10)$$

式中: $\delta = \delta_1 + \delta_3 = 2\pi(d_1 + d_3)/\lambda$; R 为腔镜 M1 和 M2 的平均反射率。

假设激光器输出光谱为洛伦兹分布^[28]:

$$I_{\text{in}}(v) = \frac{I_0}{\pi} \frac{\Delta v_L}{(v - v_0)^2 + \Delta v_L^2}, \quad (11)$$

式中: I_0 为中心频率处光强; v_0 为激光光谱中心频率; Δv_L 为激光光谱线宽。根据谐振腔的透射率式(8)和激光器输出光谱式(11)可以得到谐振腔的透射光强信号表达式为

$$I_{\text{out}} = \int_{v_1}^{v_2} I_{\text{in}}(v) T(v) dv = \int_{v_1}^{v_2} \frac{I_0}{\pi} \frac{\Delta v_L}{(v - v_0)^2 + \Delta v_L^2} \frac{4\eta_0\eta_4}{(\eta_0B + C)(\eta_0B + C)^*} dv. \quad (12)$$

当激光器关断时,高速探测器测量到的衰荡信号呈指数衰减,光腔输出的衰荡信号可表示为

$$I(t) = I_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (13)$$

式中,衰荡腔的衰荡时间 τ 为出射光强 $I(t)$ 衰减为初始透射光强 I_1 的 $1/e$ 时所需时间,与衰荡腔损耗密切相关,腔损耗包括腔镜透射损耗、腔内介质吸收损耗和其他损耗(如介质的散射损耗,衍射及偏折损耗等),表示为

$$\tau = \frac{L}{c(1 - R + \gamma)}, \quad (14)$$

式中: L 为腔长, $L = d_1 + d_2 + d_3$; c 为光速; γ 表示其他腔内损耗。对于空腔,如果腔内不含其他介质损耗,仅包含腔镜损耗,则空腔衰荡时间常数为

$$\tau_0 = \frac{L}{c(1 - R)}. \quad (15)$$

将样品垂直插入谐振腔中,由于样品的反射、散射和吸收等,腔中的总损耗增加。样品反射对衰荡时间常数的影响可以忽略不计^[26]。假设忽略样品的散射损耗,测试腔衰荡时间常数为

$$\tau_1 = \frac{L}{c(1 - R + k_{\text{sample}})}, \quad (16)$$

式中, k_{sample} 为样品的吸收损耗, $k_{\text{sample}} = d_2 \alpha_{\text{sample}} = d_2 \sigma_{\text{fc}} N$, 其中 d_2 为样品厚度, α_{sample} 为样品的吸收系数, σ_{fc} 为自由载流子捕获截面, N 为自由载流子浓度^[29]。当杂质完全电离时, $N = N_d$, 其中 N_d 是样品的掺杂浓度。通过式(15)和式(16)可以推导样品的掺杂浓度为

$$N_d = \frac{L}{cd_2\sigma_{\text{fc}}} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_0} \right). \quad (17)$$

以半导体单晶硅为例,掺杂浓度 N_d 与电阻率 ρ 的函数关系如式(18)和式(19)所示。进一步可计算电阻率。对于掺硼的 P 型单晶硅^[5-6]:

$$\rho = \frac{1.305 \times 10^{16}}{N_d} + \frac{1.133 \times 10^{17}}{N_d \left[1 + (2.58 \times 10^{-19} N_d)^{-0.737} \right]} [\Omega \cdot \text{cm}]. \quad (18)$$

对于掺磷的 N 型单晶硅:

$$\rho = \frac{6.242 \times 10^{18} 10^Z}{N_d} [\Omega \cdot \text{cm}], \quad Z = \frac{C_0 + C_1 y + C_2 y^2 + C_3 y^3}{1 + D_1 y + D_2 y^2 + D_3 y^3}, \quad (19)$$

式中: $y = \lg(N_d) - 16$; $C_0 = -3.0769$; $C_1 = 2.2108$; $C_2 = -0.62272$; $C_3 = -0.057501$; $D_1 = -0.68157$; $D_2 = 0.19833$; $D_3 = -0.018376$ 。

3 仿真分析

谐振腔腔长需满足一般稳定条件 $0 < (1 - L/\rho_1)(1 - L/\rho_2) < 1$, ρ_1 和 ρ_2 分别为两腔镜凹面的曲率半径, $\rho_1 = \rho_2 = 1 \text{ m}$, 计算得到腔长范围为 $0 \sim 2 \text{ m}$; 由于腔镜介质折射率 $n_0 \gg 1$, 腔镜反射率 $R = 1 - 4/n_0$ 。仿真设置 $d_1 = d_3 = 0.5 \text{ m}$, 样品厚度 $d_2 = 400 \mu\text{m}$, 掺杂浓度(每立方厘米的载流子数量,以下同) $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 腔镜等效介质折射率 $n_0 = n_4 = 4000$, 腔镜反射率 $R = 99.9\%$ 。

图 2 为空腔透射频谱图。根据式(4)可知,空腔的透射频谱是相位差为 δ 的梳状函数,由无数个透射峰组成,在 $\delta = m\pi$ (m 为整数)时透过率最大。从图 2 可以看出,空腔的透过率峰值最大为 1,越偏离中心频率,衰荡腔的透过率越低。

图 3 给出了不同样品基本特性参数下的腔透射频谱图。图 3(a)为不同掺杂浓度情况,可以看出,样品的掺杂浓度越大,对探测光的吸收越大,腔内损耗越大,导致透射率减小。同时,谐振频率位置不随掺杂浓度的变化而变化,这是因为谐振腔的结构并未发生变化。图 3(b)为不同样品厚度时谐振腔透过率的变化情况,可以看出,样品厚度增大时,由于样品对探测光的总吸收损耗增大,透射率同样逐渐减小。与

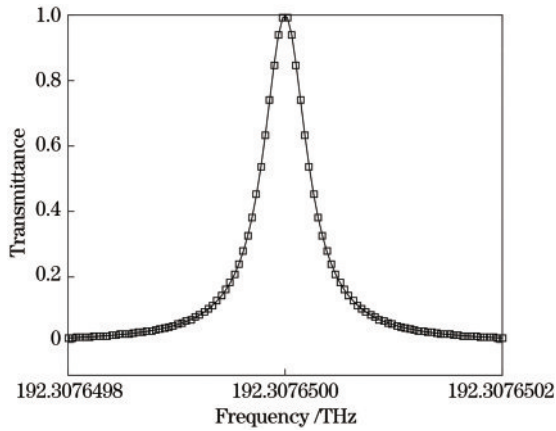


图 2 空腔透射频谱图

Fig. 2 Transmission spectrum of cavity without sample

图 3(a)不同的是,样品厚度越大,谐振频率位置偏移越大,因为样品厚度改变会影响谐振腔结构的变化。

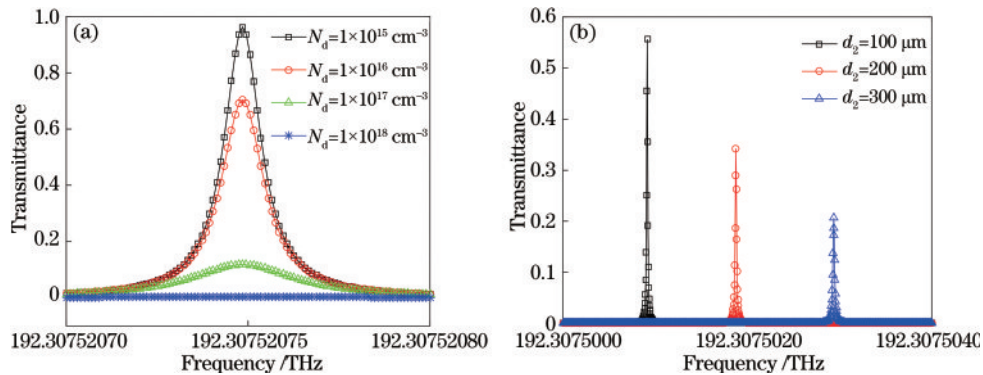


图 3 不同样品基本特性参数下的腔透射频谱图。(a)不同掺杂浓度;(b)不同样品厚度

Fig. 3 Transmission spectrum of cavity with sample. (a) Different doping concentrations; (b) different thicknesses of sample

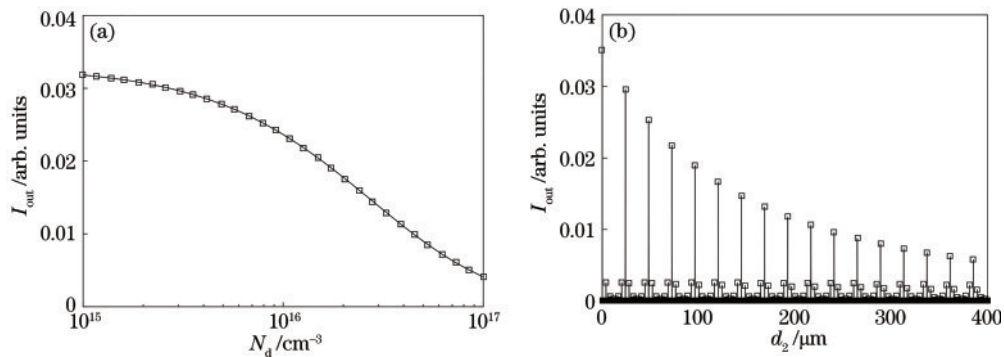


图 4 腔透射信号随不同样品特性参数的变化关系。(a)不同掺杂浓度;(b)不同样品厚度

Fig. 4 Change of cavity transmission signal along with sample. (a) Different doping concentrations; (b) different thicknesses of sample

图 5 给出了空腔和加入样品后的腔衰荡信号。图 5(a)为归一化光强曲线图,图 5(b)为腔衰荡信号的对数图。从图 5(a)可以看出,两种情况下的腔衰荡信号随时间均呈指数衰减,加入样品后,由于样品对探测光的吸收作用,信号的衰减速率增大,从而导致腔衰荡时间常数减小。从图 5(b)中可以直观地看出空腔和加入样品后的腔衰荡信号的变化情况。

图 6 分析了腔长、腔镜反射率、掺杂浓度和电阻率

因此,插入样品后,谐振腔对探测光束的透过率有所减小,谐振频率位置与空腔也发生偏移;并且样品掺杂浓度和厚度越大,样品对探测光束的吸收越大,透射峰值越小。

图 4 描述了腔透射信号与样品掺杂浓度和电阻率的关系。可以看出,腔透射信号随样品掺杂浓度和样品厚度的增大而减小,当掺杂浓度或样品厚度增大时,样品对探测光束的自由载流子吸收增强,整个谐振腔的损耗增大,使得腔透射信号减小。由此可知,根据探测光束强度变化可以有效表征掺杂浓度的变化情况,为后续实验测量奠定理论基础。图 4(b)中出现的间断现象是由于不同厚度样品的透射谱谐振频率位置不同,且呈周期性分布,当设置的单一频率满足某一厚度样品的谐振频率时透射率最大,腔透射信号达到峰值,其余厚度位置根据该频率下对应的透射率值得到腔透射信号的大小。

对腔衰荡时间常数的影响。从图 6(a)可以看出,腔长的增大会导致腔衰荡时间常数线性增大;从图 6(b)可以看出,腔镜反射率越高,引起的腔损耗越小,衰荡时间越长。从图 6(c)、6(d)中可以看出,样品掺杂浓度和厚度的增加均会使得沿光传播方向上样品的吸收损耗增大,衰荡时间减小。当样品掺杂浓度较低时,掺杂引起的损耗相对于其他损耗较小,因此对衰荡时间的影响不大。在上述仿真参数设置情况下,掺杂浓度大

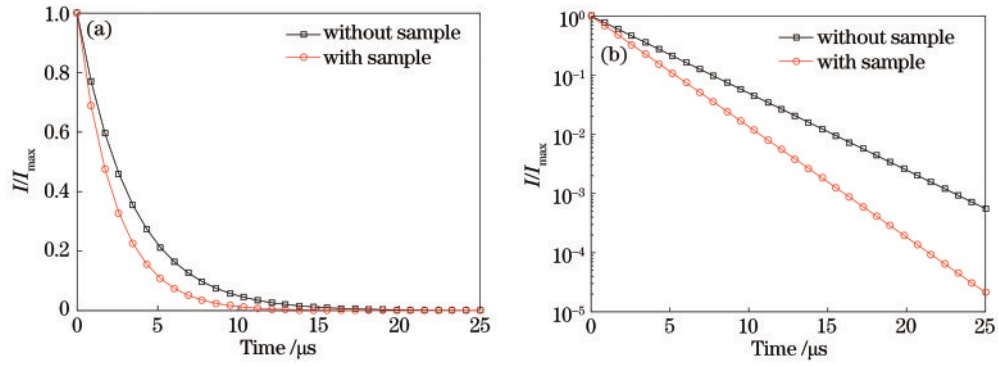


图 5 空腔和加入样品的 CRD 信号。(a) 归一化光强曲线; (b) 取对数图

Fig. 5 CRD signals with and without sample. (a) Normalized signal; (b) logarithmic graph

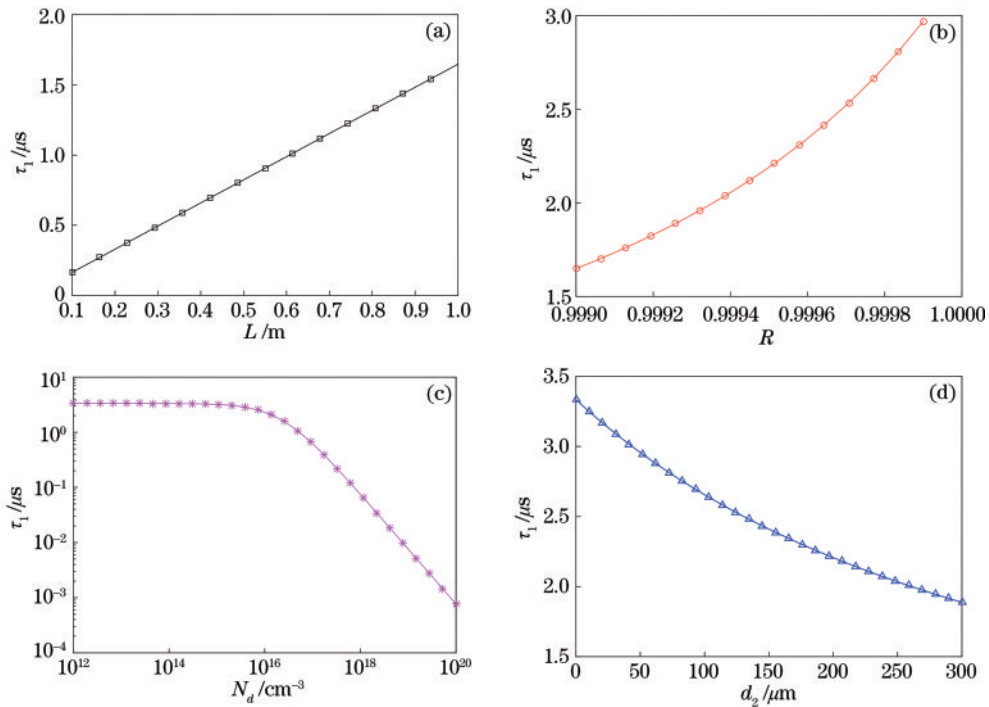


图 6 CRD 时间常数与不同参数的关系。(a) 腔长 L ; (b) 腔镜反射率 R ; (c) 掺杂浓度 N_d ; (d) 样品厚度 d

Fig. 6 Dependences of CRD time on different parameters. (a) Cavity length L ; (b) cavity mirror reflectivity R ;

(c) doping concentration N_d ; (d) sample thickness d

于 10^{15} cm^{-3} 的样品可以实现精确测量,若要拓宽低掺杂方向的测量范围,就需要进一步减小腔镜损耗,即选择反射率更高的腔镜。需要注意的是,随着掺杂浓度的增大,衰荡时间常数将会减小,实验测量中对探测器的响应特性要求也有所提高。

4 实验测量

为了验证仿真结果的可靠性,对真实样品进行了实验测量。图 7 所示为实验测量系统装置示意图。测量系统主要由半导体激光器、准直激光器、光学谐振腔、光电探测器、函数发生器及示波器组成。半导体激光器发出近红外探测光,从腔镜 M2 的中心位置垂直入射到谐振腔中,当探测光耦合进谐振腔后,探测光在腔中往返传输,从腔镜 M1 透射出的探测光束被光电

探测器接收,经光电转换后由示波器进行显示和数据存储。通过采集空腔和加入样品的腔衰荡信号并进行分析处理,可最终计算出样品的掺杂浓度和电阻率。为了便于光路调节,实验中采用波长为 633 nm 的激光器输出的光束进行辅助调节。实验中所用的半导体激光器的输出波长为 1560 nm,腔长 L 为 0.32 m,腔镜 M1 和 M2 的曲率半径为 1 m,样品为 P 型 C—Si 硅片,厚度为 400 μm 。探测器为 InGaAs 近红外光电探测器,响应光谱范围为 900~1700 nm,带宽为 125 MHz。

为了得到较大的测量信号,实验中采用直腔型结构,当采用传统的方波下降沿方式采集信号时,其采集效率较低。为此,设计了一种阈值电路用于激光器的关断。首先设置参考电压,将光电探测器探测到的信号与其进行比较,当探测信号的电压幅值大于参考电

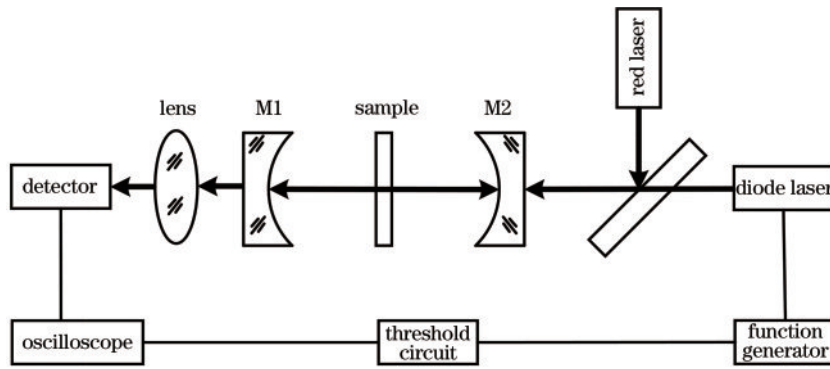


图 7 光反馈 CRD 法测量光路图

Fig. 7 Optical circuit diagram of optical feedback CRD technology

压时关断半导体激光器并进行信号采集。图 8(a) 为半导体激光器所用电源的输入电压,当电压由高电平变化为低电平时,关断激光器。图 8(b) 为光电探测器探测到的激光器关断前后腔衰荡信号的变化情况,可以看出,激光器关断后,探测器探测到的信号随时间呈指数衰减。

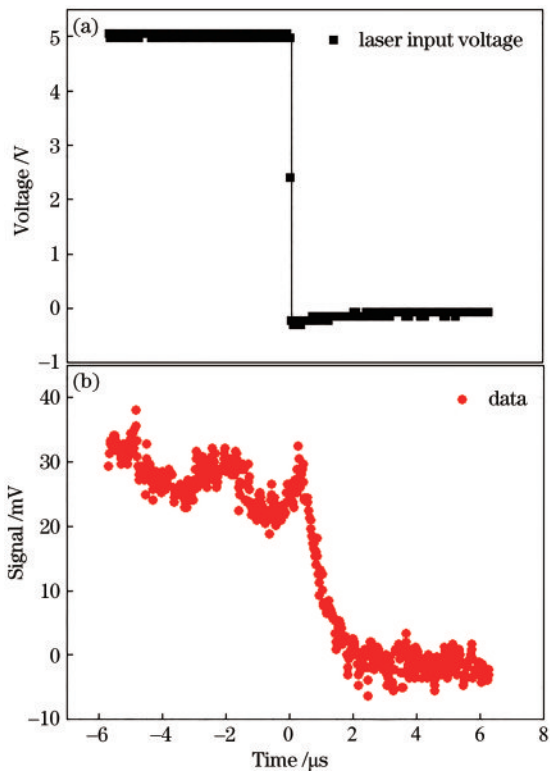


图 8 加入阈值电路后的实验结果。(a) 激光器输入电压; (b) 典型的 CRD 信号

Fig. 8 Experimental results after adding threshold circuit. (a) Input voltage of laser; (b) typical CRD signal

图 9 分别为加入样品前后测得的一组腔衰荡信号及其单指数拟合结果。可以看出,加入样品后,由于样品的吸收作用,腔衰荡信号减小,信号的衰减速率变大,与图 5(a) 的仿真结果一致。通过空腔的衰荡时间

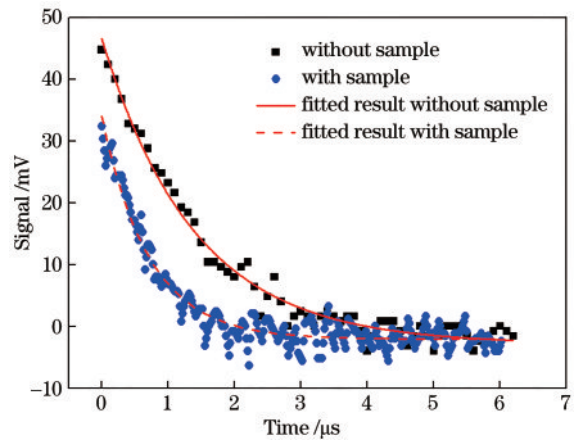


图 9 加入样品前后的 CRD 信号及拟合结果

Fig. 9 CRD signals and fitting results with and without sample 拟合值计算可知腔镜的平均反射率为 99.92%,与生产厂家给出的 >99.9% 相一致,验证了该测量方法的正确性。

表 1 和表 2 分别为样品掺杂浓度和电阻率的多次重复测量结果,重复测量精度较高。经统计分析后,掺杂浓度和电阻率结果分别为 $(2.65 \pm 0.38) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 和 $(0.61 \pm 0.07) \Omega \cdot \text{cm}$ 。测量的电阻率结果与厂家给出的四探针测量结果 1~10 $\Omega \cdot \text{cm}$ 基本一致,测量结果偏低,原因在于被测样品表面可能存在污染和划痕,这将导致腔内额外的损耗,使得计算得到的电阻率偏低。其次,样品角度和位置误差同样会引起测量结果存在误

表 1 样品的掺杂浓度测量结果

Table 1 Measured results of doping concentration of sample

Count	Measurement N_d / cm^{-3}	Mean $\bar{N}_d / \text{cm}^{-3}$	Standard deviation $\sigma_{N_d} / \text{cm}^{-3}$
1	2.37×10^{16}		
2	2.91×10^{16}		
3	3.29×10^{16}	2.65×10^{16}	0.38×10^{16}
4	2.38×10^{16}		
5	2.32×10^{16}		

表 2 样品的电阻率测量结果
Table 2 Measured results of resistivity of sample

Count	Measurement $\rho / (\Omega \cdot \text{cm})$	Mean $\bar{\rho} / (\Omega \cdot \text{cm})$	Standard deviation $\sigma_{\rho} / (\Omega \cdot \text{cm})$
1	0.66		
2	0.55		
3	0.50	0.61	0.07
4	0.66		
5	0.67		

差,如果样品偏离谐振腔中心位置,采用单指数衰减函数拟合将会产生一定的误差^[26]。另外,根据式(17)可知,掺杂浓度的计算与腔长和样品厚度直接相关,腔长和样品厚度均值存在一定的误差,这将导致掺杂浓度和电阻率的计算结果偏离真实值,例如样品厚度测量值偏小,将导致掺杂浓度的计算偏大,电阻率的结果相应偏小。

根据式(17)推导了 CRD 法测量硅片掺杂浓度的标准偏差传递公式为

$$\sigma_{N_d} = \sqrt{\left(\frac{\partial N_d}{\partial L}\right)^2 \sigma_{L_1}^2 + \left(\frac{\partial N_d}{\partial d_2}\right)^2 \sigma_{d_2}^2 + \left(\frac{\partial N_d}{\partial \tau_1}\right)^2 \sigma_{\tau_1}^2 + \left(\frac{\partial N_d}{\partial \tau_0}\right)^2 \sigma_{\tau_0}^2}, \quad (20)$$

式中: σ_{L_1} 和 σ_{d_2} 分别代表谐振腔长和样品厚度的测量不确定度; σ_{τ_1} 和 σ_{τ_0} 分别代表测试腔的衰荡时间和空腔的衰荡时间的测量标准差,各标准差的系数为对应参数的误差传递系数。可以看出,掺杂浓度的测量精度与 4 个参数的测量精度有关系。其中, $\sigma_{L_1} = 0.29 \text{ mm}$, $\sigma_{d_2} = 15 \mu\text{m}$,根据腔衰荡时间常数的测量值计算得到 $\sigma_{\tau_1} = 0.057 \mu\text{s}$ 和 $\sigma_{\tau_0} = 0.048 \mu\text{s}$,最后代入式(20)计算得到的掺杂浓度的合成标准差 $\sigma_{N_d} = 0.46 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。同理可计算出电阻率合成标准差 $\sigma_{\rho} = 0.09 \Omega \cdot \text{cm}$,与表 1 和表 2 中的统计标准差结果基本一致,证明了测量结果的正确性。

5 结 论

基于自由载流子吸收理论和谐振腔理论,建立了用于半导体材料掺杂特性测量的 CRD 信号理论模型,通过仿真分析研究了样品特性参数和谐振腔结构参数对信号的影响。仿真结果表明,随着掺杂浓度的增大,谐振腔的透过率和衰荡时间常数均逐渐减小;样品厚度变化时,除了透过率和衰荡时间常数外,谐振频率同样也发生相应变化。进一步通过实验对单晶硅片的掺杂特性,如掺杂浓度和电阻率进行了测量,证实了该方法的正确性。该方法有望进一步应用于半导体材料加工工艺如掺杂和退火工艺的研究。

参 考 文 献

[1] 王丹, 王晓丹, 马海, 等. Ga₂O₃ 材料的掺杂研究进展

[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(15): 1516025.

Wang D, Wang X D, Ma H, et al. Progress of doping in Ga₂O₃ materials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(15): 1516025.

[2] 王蕊, 牛立刚, 贺媛, 等. 四探针法测试半导体掺杂浓度的实验研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2019, 37(5): 507-511.

Wang R, Niu L G, He Y, et al. Research of four-probe method for semiconductor doping concentration experiment [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2019, 37(5): 507-511.

[3] 杨恒青, 颜佳骅, 陈俭, 等. 用二次离子质谱和扩展电阻探针技术测量硅中注入硼的深度分布及扩展电阻探针技术分辨率的估算[J]. 半导体学报, 2003, 24(3): 290-297.

Yang H Q, Yan J H, Chen J, et al. Application of secondary ion mass spectrometry and spreading resistance probe technique for measuring depth profile of boron implanted in silicon and estimation of resolution of spreading resistance probe technique[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(3): 290-297.

[4] Arora A, Drummond P J, Ruzyllo J. Electrical characterization of silicon-on-insulator wafers using photoconductance decay (PCD) method[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2015, 5(4): P3069-P3072.

[5] Sun Q M, Melnikov A, Wang J, et al. Simultaneous determination of effective carrier lifetime and resistivity of Si wafers using the nonlinear nature of photocarrier radiometric signals[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(15): 15LT01.

[6] Song P, Melnikov A, Sun Q M, et al. Contactless non-destructive imaging of doping density and electrical resistivity of semiconductor Si wafers using lock-in carrierography[J]. Semiconductor Science and Technology, 2018, 33(12): 12LT01.

[7] Wang Q, Liu W G, Gong L, et al. Determination of doping concentration of heavily doped silicon wafers using photon reabsorption in photocarrier radiometry[J]. AIP Advances, 2020, 10(3): 035118.

[8] Lim S Y, Macdonald D. Measuring dopant concentrations in p-type silicon using iron-acceptor pairing monitored by band-to-band photoluminescence[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(8): 2485-2489.

[9] Lim S Y, Phang S P, Trupke T, et al. Dopant concentration imaging in crystalline silicon wafers by band-to-band photoluminescence[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(11): 113712.

[10] Giesecke J A, Schubert M C, Warta W. Measurement of net dopant concentration via dynamic photoluminescence [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112(6): 063704.

[11] Saldutti M, Tibaldi A, Cappelluti F, et al. Impact of carrier transport on the performance of QD lasers on silicon: a drift-diffusion approach[J]. Photonics Research, 2020, 8(8): 1388-1397.

[12] Huang Q K, Yu H, Zhang Q, et al. Thermally enhanced responsivity in an all-silicon optical power monitor based

- on defect-mediated absorption[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(11): 2205-2213.
- [13] Morville J, Romanini D. Sensitive birefringence measurement in a high-finesse resonator using diode laser optical self-locking[J]. *Applied Physics B*, 2002, 74(6): 495-501.
- [14] Zhou S, Han Y L, Li B C. Pressure optimization of an EC-QCL based cavity ring-down spectroscopy instrument for exhaled NO detection[J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(2): 1-8.
- [15] Cassar N, Tang W Y, Gabathuler H, et al. Method for high frequency underway N_2 fixation measurements: flow-through incubation acetylene reduction assays by cavity ring down laser absorption spectroscopy (FARACAS)[J]. *Analytical Chemistry*, 2018, 90(4): 2839-2851.
- [16] Sanders S E, Willis O R, Nahler N H, et al. Absolute fluorescence and absorption measurements over a dynamic range of 10^6 with cavity-enhanced laser-induced fluorescence[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2018, 149(1): 014201.
- [17] Egashira K. Optimal mirror reflectivity for transparency of a thin-film absorbent in a Fabry-Perot cavity[J]. *Optical Review*, 2015, 22(6): 888-892.
- [18] 曲哲超, 李斌成, 韩艳玲. 光学元件失调对 CRD 高反射率测量影响的理论分析[J]. *光子学报*, 2011, 40(9): 1366-1371.
- Qu Z C, Li B C, Han Y L. Influence of test mirror's misalignment on high reflectivity measurement with cavity ring-down technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(9): 1366-1371.
- [19] 易亨瑜, 吕百达, 胡晓阳, 等. 腔长失调对 CRD 法测量精度的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(8): 993-996.
- Yi H Y, Lü B D, Hu X Y, et al. Influence of length misadjustment on metrical precision by cavity ring-down method[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2004, 16(8): 993-996.
- [20] 易亨瑜, 吕百达, 张凯. 衰荡光腔中空镜倾斜分析[J]. *激光技术*, 2006, 30(1): 5-8.
- Yi H Y, Lü B D, Zhang K. Analysis of cavity mirrors' tilt in ring-down cavity[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 5-8.
- [21] 徐毓阳, 余锦, 翁泽强, 等. 腔衰荡吸收光谱技术的研究进展及典型应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 1900001.
- Xu Y Y, Yu J, Mo Z Q, et al. Advances in cavity ring-down absorption spectroscopy research and typical applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1900001.
- [22] 杜星湖. 基于耦合 CRD 技术的高反射率测量方法研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2020.
- Du X H. Study on high reflectivity measurement method based on coupled cavity ring-down technology[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [23] 尹玺, 万生鹏, 熊新中, 等. 基于法布里-珀罗微腔结构的光纤声传感系统研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 0312003.
- Yin X, Wan S P, Xiong X Z, et al. Study of a optical fiber acoustic sensing system based on F-P microcavity structure[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0312003.
- [24] 薛颖. CRD 高反射率测量调控方法研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2020.
- Xue Y. Study on cavity adjustment method of cavity ring-down high reflectivity measurement[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [25] Liu G S, Xiong X, Hu S Q, et al. Photonic cavity enhanced high-performance surface plasmon resonance biosensor[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(4): 448-456.
- [26] Terasaki A, Kondow T, Egashira K. Continuous-wave cavity ringdown spectroscopy applied to solids: properties of a Fabry-Perot cavity containing a transparent substrate[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2005, 22(3): 675-686.
- [27] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- Tang J F, Gu P F, Liu X. Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.
- [28] 曲哲超. CRD 技术理论与应用研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2016.
- Qu Z C. Study on theory and application of cavity ring-down technique[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [29] Baker-Finch S C, McIntosh K R, Yan D, et al. Near-infrared free carrier absorption in heavily doped silicon[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(6): 063106.