

## 光通信用雪崩光电二极管 (APD) 频率响应特性研究\*

莫秋燕 赵彦立<sup>†</sup>

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

(2010年4月20日收到; 2010年9月2日收到修改稿)

吸收层、电荷层和倍增层分离结构雪崩光电二极管 (SACM-APD), 包括 InP/InGaAs、InAlAs/InGaAs 和 Si/Ge APD 是光通信领域近年来研究的热点. 本文基于电路模型, 系统比较了不同外延层厚度、不同材料以及不同结构 APD 的频率响应特性, 重点探讨 Si/Ge APD 吸收层厚度、光敏面大小、寄生参数等各项参数对带宽的影响, 仿真结果与实际器件实验数据相符合. 本文的研究成果对 SACM-APD 的优化设计具有指导意义.

**关键词:** SACM-APD, 电路模型, 频率响应

**PACS:** 29.40.Cs, 42.79.Sz, 42.79.-e

## 1. 引言

SACM-APD 具有内部增益大、灵敏度高、低噪声和高增益带宽积等优点<sup>[1]</sup>, 在光通信系统中得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>. 对于传统的 InP/InGaAs APD, 由于增益层 InP 材料的  $k$  值在 0.4—0.5 范围内, 在满足一定灵敏度要求条件下, 增益带宽积 (GBP) 通常只能达到 100 GHz 左右<sup>[3]</sup>. 相比之下, InAlAs/InGaAs APD 增益层 InAlAs 材料的  $k$  值在 0.2—0.3 的范围内<sup>[4]</sup>; Si/Ge APD 增益层 Si 的  $k$  值  $< 0.1$ <sup>[5]</sup>, 说明 Si 最有希望作为光通信 APD 的增益层候选材料. Si 基探测器一直受到重视<sup>[6]</sup>. 研究表明, 与传统的 InP/InGaAs APD 相比, Si/Ge APD 具有 GBP 高 ( $> 200$  GHz)、击穿电压低 (27 V)、击穿电压温度系数低 ( $< 0.014$  V/°C)、过剩噪声因子低、整个生产工艺与标准 CMOS 制程完全兼容和易于与 TIA 等后续电路实现单片集成等一系列优点, 是光通信领域近年来研发的热点.

在 Gbit/s 的光传输系统中, APD 的频率响应特性是一个重要参数, 建立 APD 的频率响应的电路模型, 对优化 APD 器件的性能具有重要意义. 到目前为止, 文献上对 InP/InGaAs APD 和 InAlAs/InGaAs APD

频率响应的电路模型研究已经有很多报道<sup>[7-15]</sup>, 但对 Si/Ge APD 的电路模型研究尚不充分<sup>[16,17]</sup>. 本文在已有工作的基础上, 导出了 Si/Ge SACM-APD 频率响应的电路模型, 系统研究了正入射、波导型和谐振腔型的 Si/Ge APD 的频率响应特性, 探讨外延层厚度、入射有效面积、寄生参数等各项参数对 APD 带宽的影响. 对 InP/InGaAs, InAlAs/InGaAs 和 Si/Ge APD 的频率特性进行了比较研究. 本文的仿真结果与实际器件实验数据相符合, 说明本文的电路模型对 SACM-APD 的优化设计具有指导意义.

## 2. 物理模型

根据 Mai 和 Deen 等的基础理论, 正入射结构 SACM APD 初次、二次电子空穴的频率响应公式为<sup>[12]</sup>

$$N(\omega) = \frac{\eta P_0}{h\nu} \left\{ \exp(-j\omega(x_t + x_m)/v_n) \cdot [\exp(-\alpha W_a) - \exp(-j\omega W_a/v_n)] \left( \frac{1}{j\omega} + \frac{1}{\alpha v_n - j\omega} \right) + \frac{1}{j\omega} (1 - \exp(-\alpha W_a)) \right\}, \quad (1)$$

$$P(\omega) = \frac{\eta P_0}{h\nu} \left\{ \frac{1}{\alpha v_n + j\omega} [1 - \exp(-\alpha W_a - j\omega W_a/v_p)] - \frac{\exp(-\alpha W_a)}{j\omega} [1 - \exp(-j\omega W_a/v_p)] \right\}, \quad (2)$$

\* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2008AA01Z207), 湖北省自然科学基金 (批准号: 2010CDB01606), 华为公司创新研究计划 (批准号: YJCB2010032NW) 和教育部留学归国基金资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: yanlizhao@mail.hust.edu.cn

$$N_s(\omega) = \frac{\eta P_0}{h\nu} \left( \frac{1}{j\omega} + \frac{1}{\alpha v_n - j\omega} \right) \times [\exp(-j\omega W_a/v_n) - \exp(-\alpha W_a)] \times \exp(-j\omega x_i/v_n) \times \left[ 1 - \exp\left(-j\omega \frac{x_m}{v_n}\right) \right] \times \frac{M-1}{1+j\omega(M-1)\tau_m}, \quad (3)$$

$$P_s(\omega) = \frac{\eta P_0}{h\nu} \exp(-j\omega x_i/v_n) \times \left( \frac{1}{j\omega} + \frac{1}{\alpha v_n - j\omega} \right) \times \left( 1 - \exp\left(-j\omega \frac{x_i + W_a}{v_p}\right) \right) \times [\exp(-j\omega W_a/v_n) - \exp(-\alpha W_a)] \times \frac{M-1}{1+j\omega(M-1)\tau_m}. \quad (4)$$

以上各式及以下各式中的物理量： $\eta$  为量子效率； $h$  为普朗克常数； $\nu$  为入射光频率； $W_a, x_g, x_c, x_m$  分别为吸收层、过渡层、电荷层和倍增层的厚度； $x_1, x_{g1}, x_{g2}$  分别为电荷层和过渡层的总的厚度、在吸收层周围的两个过渡层厚度； $D$  为整个耗尽区的宽度； $\alpha$  为吸收层的吸收系数； $M$  为倍增增益； $z$  为任意位置； $P, P_s$  分别表示产生的初始空穴和二次空穴； $N, N_s$  分别表示产生的初始电子和二次电子； $I_{ph}(\omega), I_{ph}(0)$  分别表示输出光电流和 dc 光电流； $\tau_m$  为雪崩建立时间； $v_n, v_p$  分别为电子、空穴的饱和速度； $P_0$  为输入光功率； $t, \delta(t)$  分别为时间和时域上的单位脉冲函数； $j$  为虚数单位； $\omega$  为任意频率； $I_{in}(\omega), I_{out}(\omega)$  分别表示频域上的输入输出电流信号； $i_{in}(t), i_{out}(t)$  分别表示时域上的系统输入输出电流信号； $\eta_f, \eta_b$  分别表示前向光波与后向光波的量子效率； $\Delta u_m$  为死区长度。

WG-APD 与 RCE-APD 的计算方法是一样的，所不同的是 WG-APD 是侧面入射，因此产生的光生载流子密度在电流传播方向上是均匀分布的；而对于 RCE-APD，相当于在正面入射的情况下，但由于底部反射，所以多加了一次底部入射。基于这些区别，可以得到 REC-SACM-APD 初次、二次电子空穴的频率响应公式为<sup>[7]</sup>

$$N(\omega) = \frac{P_i}{h\nu} \left\{ (\eta_b + \eta_f) \frac{[1 - \exp(-\alpha W_a)]}{j\omega} \times [1 - \exp(-j\omega(x_i + x_m)/v_n)] + \frac{1}{j\omega} \exp(-j\omega(x_i + x_m)/v_n) \times [1 - \exp(-j\omega W_a/v_n)] \right\}$$

$$\times [\eta_f - \eta_b \exp(-\alpha W_a)] + \exp(-j\omega(x_i + x_m)/v_n) \times \left\{ \frac{\eta_f}{\alpha v_n - j\omega} [\exp(-\alpha W_a) - \exp(-j\omega W_a/v_n)] + \frac{\eta_b}{\alpha v_n + j\omega} \times [1 - \exp(-\alpha W_a - j\omega W_a/v_n)] \right\}, \quad (5)$$

$$P(\omega) = \frac{P_i}{h\nu} \left\{ (\eta_b + \eta_f) \frac{[1 - \exp(-\alpha W_a)]}{j\omega} \times [1 - \exp(-j\omega x_{g1}/v_p)] + \frac{1}{j\omega} \exp(-j\omega x_{g1}/v_p) [1 - \exp(-j\omega W_a/v_p)] \times [\eta_b - \eta_f \exp(-\alpha W_a)] + \exp(-j\omega x_{g1}/v_p) \times \left\{ \frac{\eta_b}{\alpha v_p - j\omega} [\exp(-\alpha W_a) - \exp(-j\omega W_a/v_p)] + \frac{\eta_f}{\alpha v_p + j\omega} \times [1 - \exp(-\alpha W_a - j\omega W_a/v_p)] \right\} \right\}, \quad (6)$$

$$P_s(\omega) = \frac{P_i(M-1)}{h\nu} \exp(-j\omega(x_i + \Delta u_m)/v_n) \times [1 - \exp(-j\omega(x_{g1} + W_a + x_i + \Delta u_m)/v_p)] \times \left( \frac{1}{1+j\omega(M-1)\tau_m} \right) \times \left\{ \eta_f \left[ \frac{1}{j\omega - \alpha v_n} - \frac{1}{j\omega} \right] \times [\exp(-W_a\alpha) - \exp(-j\omega W_a/v_n)] - \eta_b \left[ \frac{1}{j\omega + \alpha v_n} - \frac{1}{j\omega} \right] \times [1 - \exp(-W_a\alpha - j\omega W_a/v_n)] \right\}, \quad (7)$$

$$N_s(\omega) = \frac{P_i(M-1)}{h\nu} \exp(-j\omega x_i/v_n) \times [\exp(-j\omega x_m/v_n)] \times \left( \frac{1}{1+j\omega(M-1)\tau_m} \right) \times \left\{ \eta_f \left[ \frac{1}{j\omega} - \frac{1}{j\omega - \alpha v_n} \right] \times [\exp(-W_a\alpha) - \exp(-j\omega W_a/v_n)] - \eta_b \left[ \frac{1}{j\omega} - \frac{1}{j\omega + \alpha v_n} \right] \times [1 - \exp(-W_a\alpha - j\omega W_a/v_n)] \right\}. \quad (8)$$

WG-SACM-APD 初次、二次电子空穴的频率响应公式为<sup>[8]</sup>

$$N(\omega) = \eta \frac{P_i}{h\nu} \left\{ \frac{1}{j\omega} + \frac{v_n(1 - \exp(-j\omega W_a/v_n)) \exp(-j\omega(x_t + x_m))}{W_a \omega^2} \right\}, \quad (9)$$

$$P(\omega) = \eta \frac{P_i}{h\nu} \times \left\{ \frac{1}{j\omega} + \frac{v_p(1 - \exp(-j\omega W_a/v_p))}{W_a \omega^2} \right\} \quad (10)$$

$$P_s(\omega) = \eta \frac{P_i}{h\nu} \left( \frac{M-1}{1 + j\omega\tau_m(M-1)} \right) \times \left( \frac{v_n}{W_a \omega^2} \right) \cdot [1 - \exp(-j\omega W_a/v_n)] \times \exp(-j\omega(x_t + \Delta u_m)/v_n) \times [\exp(-j\omega(W_a + x_t + \Delta u_m)/v_p) - 1], \quad (11)$$

$$N_s(\omega) = \eta \frac{P_i}{h\nu} \left( \frac{M-1}{1 + j\omega\tau_m(M-1)} \right) \times \left( \frac{v_n}{W_a \omega^2} \right) \cdot [1 - \exp(-j\omega W_a/v_n)] \times \exp(-j\omega x_t/v_n) \times [\exp(-j\omega x_m/v_n) - \exp(-j\omega \Delta u_m/v_n)]. \quad (12)$$

本文以正入射 SACM APD 为例,讨论 SACM APD 电路模型的构建. WG-APD 与 RCE-APD 的电路模型的构建可以采用完全类似的方法得到.

通过(1)–(4)式,将 APD 的频率响应归一化:

$$H(\omega) = \frac{h\nu}{\eta P_0} \times \frac{[v_n(N(\omega) + N_s(\omega)) + v_p(P(\omega) + P_s(\omega))]}{M(1 - \exp(-\alpha W_a))}. \quad (13)$$

考虑寄生 RC 参数对 APD 频响的影响,APD 的内部输出光电流为<sup>[12]</sup>

$$\frac{I_{ph}(\omega)}{I_{ph}(0)} = H(\omega) \frac{1}{1 + j\omega R_t C_p - \omega^2 C_p L_p}, \quad (14)$$

$$I_{ph}(0) = \frac{q}{D} \cdot \frac{\eta P_0}{h\nu}, \quad (14)$$

$$\frac{1}{C_p} = \sum_i \frac{1}{C_i}, \quad (15)$$

$$C_i = \frac{\epsilon_0 \epsilon_i A}{x_i}, \quad (16)$$

$R_t$  为串联电阻  $R_s$  和负载电阻  $R_l$  之和,  $L_p$  为焊盘电感与金丝电感之和,  $C_i$  为对应厚度为  $x_i$  的  $i$  层电容,  $A$  为器件有效面积,  $\epsilon_i$  为耗尽区的相对介电常数.

### 3. 电路模型

根据信号系统理论,在线性时不变系统中,时域上的输出信号等于输入信号与系统脉冲响应的卷积,多元线性时不变系统的级联总的脉冲响应是个别系统脉冲响应的卷积;频域上的输出信号等于输入信号与系统函数的乘积,多元线性时不变系统

的级联总的脉冲响应是个别系统脉冲响应的乘积<sup>[18]</sup>. 本文中,  $\eta P_0/(h\nu)$  代表光输入,  $H(\omega)H_{ext}(\omega)$  表示 APD 系统的频率响应. 我们将 APD 总的频率响应分为几个小部分作为频响的子系统,根据(1)–(4)式可以得到子系统框图,如图 1,其中五种典型的子系统与输出信号的关系如下:

$$I_{out}(\omega) = z \cdot I_{in}(\omega), \quad (17)$$

$$I_{out}(\omega) = I_{in}(\omega) \cdot \exp(-j\omega \cdot z), \quad (18)$$

$$I_{out}(\omega) = I_{in}(\omega) \cdot \frac{1}{j\omega \cdot z}, \quad (19)$$

$$I_{out}(\omega) = I_{in}(\omega) \cdot \frac{1}{z + j\omega}, \quad (20)$$

$$I_{out}(\omega) = I_{in}(\omega) \cdot \frac{1}{z - j\omega}. \quad (21)$$

表 1 给出了电路图中所需的物理量数值. 表 1 中 APD<sub>1</sub>, APD<sub>2</sub> 与 APD<sub>3</sub> 分别为 Si/Ge SACM-APD, InAlAs/InGaAs SACM-APD 和 InP/InGaAs SACM-APD. 根据基本的电路知识<sup>[19]</sup>,那些无源电路元件和他们阻抗之间的关系如表 2. 图 2 是典型子电路框图,(17)式子系统的频率响应可以看成是一个增益为  $z$  的电流控制电流源(CCCS)如图 2(a)所示,时域上的子系统的输出信号可以从(18)式得到

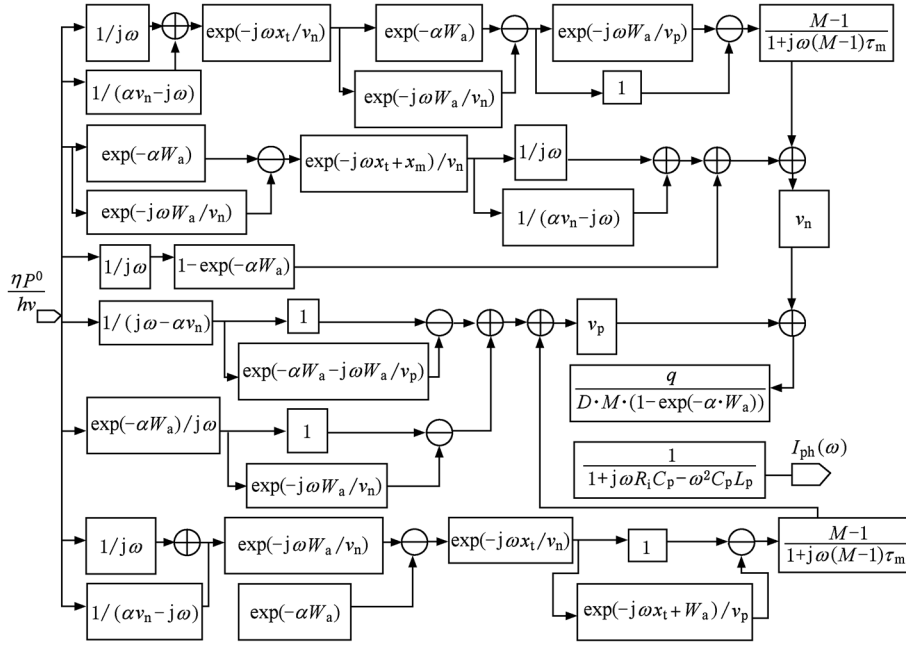


图1 子系统框图

表1 物理参数

参数	APD <sub>1</sub>	APD <sub>2</sub>	APD <sub>3</sub>
$w_a / \mu\text{m}$	1	1	2.5
$x_g / \text{nm}$	0	150	100
$x_c / \text{nm}$	100	150	70
$x_m / \text{nm}$	500	200	150
$v_n / (10^6 \text{ cm/s})$	10	8	6.7
$v_p / (10^6 \text{ cm/s})$	6	6	3.35
$\tau_m$	$1/(2\pi \cdot 153 \text{ GHz})$	$1/(2\pi \cdot 120 \text{ GHz})$	1.54 ps
$\alpha / (10^6 \text{ cm/s})$	0.706	1.15	1.15

表2 基本无源元件的阻抗

无源元件	数值	阻抗
电阻	$z$	$z$
电感	$z$	$j\omega \cdot z$
电容	$z$	$1/(j\omega \cdot z)$

$$i_{\text{out}}(t) = \mathfrak{F}^{-1}(I_{\text{out}}(\omega)) = \mathfrak{F}^{-1}[I_{\text{in}}(\omega) \cdot \exp(-j\omega \cdot z)]$$

$$= i_{\text{in}}(t) * \delta(t - z) = i_{\text{in}}(t - z). \quad (22)$$

从(22)式中可以看到子系统(18)可以用一个时延为  $z$  的 CCCS 来表示,如图 2(a), (19)式的子系统可以用图 2(b)来实现:输入电流流经电容值为  $zF$  的电容,电容的电压为  $V_{\text{out}}(\omega) = I_{\text{in}}(\omega) \cdot 1/(j\omega \cdot z)$  电压控制电流源是将电容的电压转化为输出电流

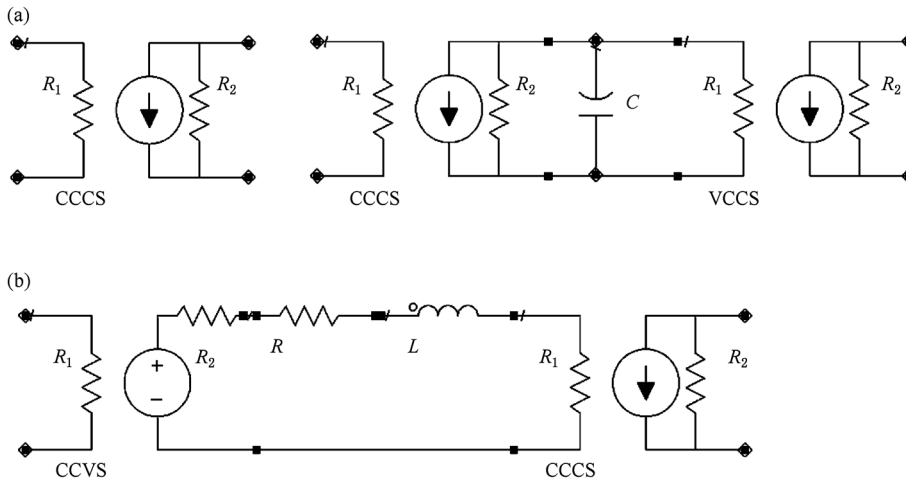


图2 典型子电路框图(CCCS:电流控制电流源, $R_1 = 0, R_2 = \infty$ ; VCCS:电压控制电流源, $R_1 = \infty, R_2 = \infty$ ; CCVS:电流控制电压源, $R_1 = 0, R_2 = \infty$ )

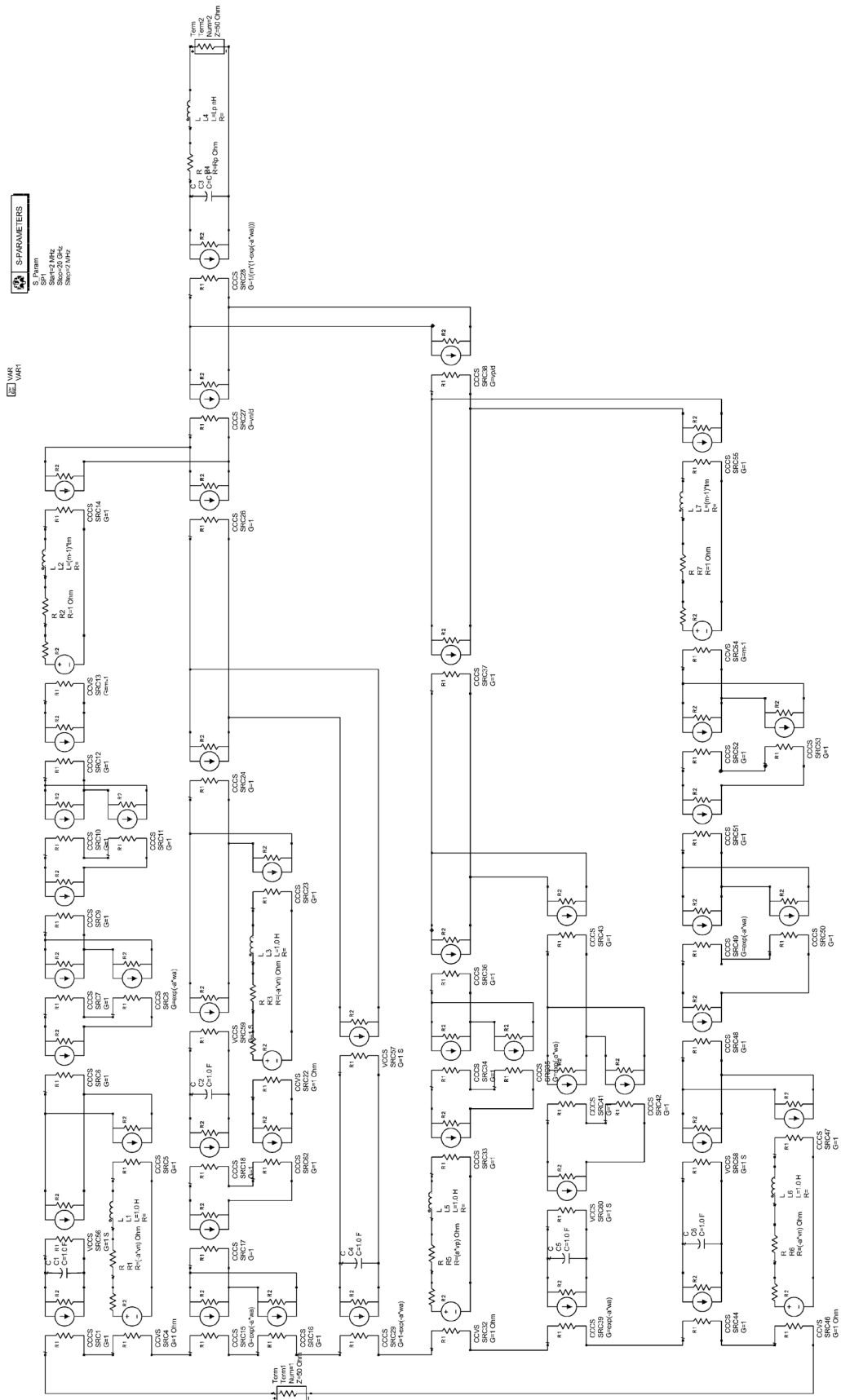


图3 Si/Ge SACM-APD 等效电路图

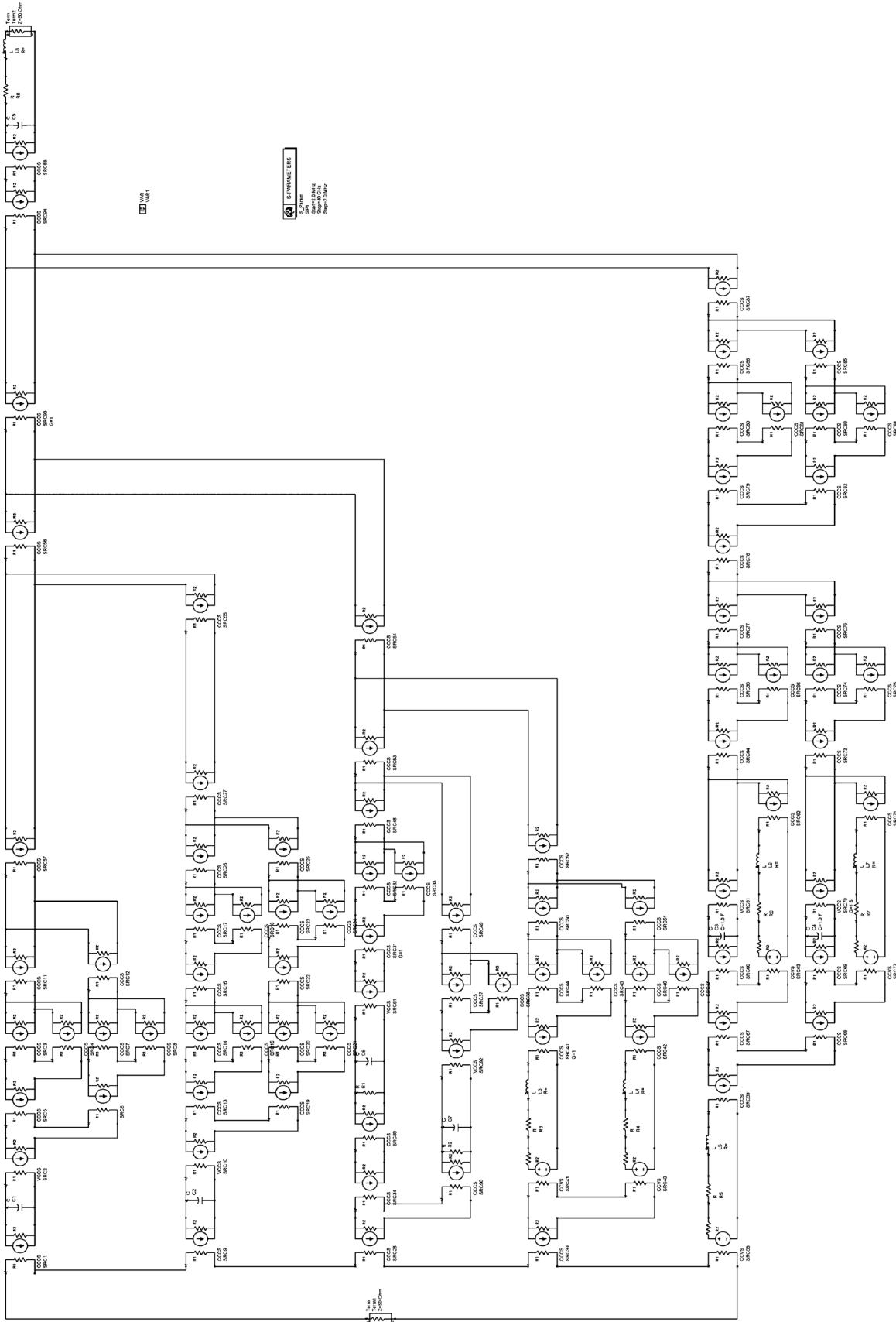


图4 RCE-SACM-APD 等效电路图

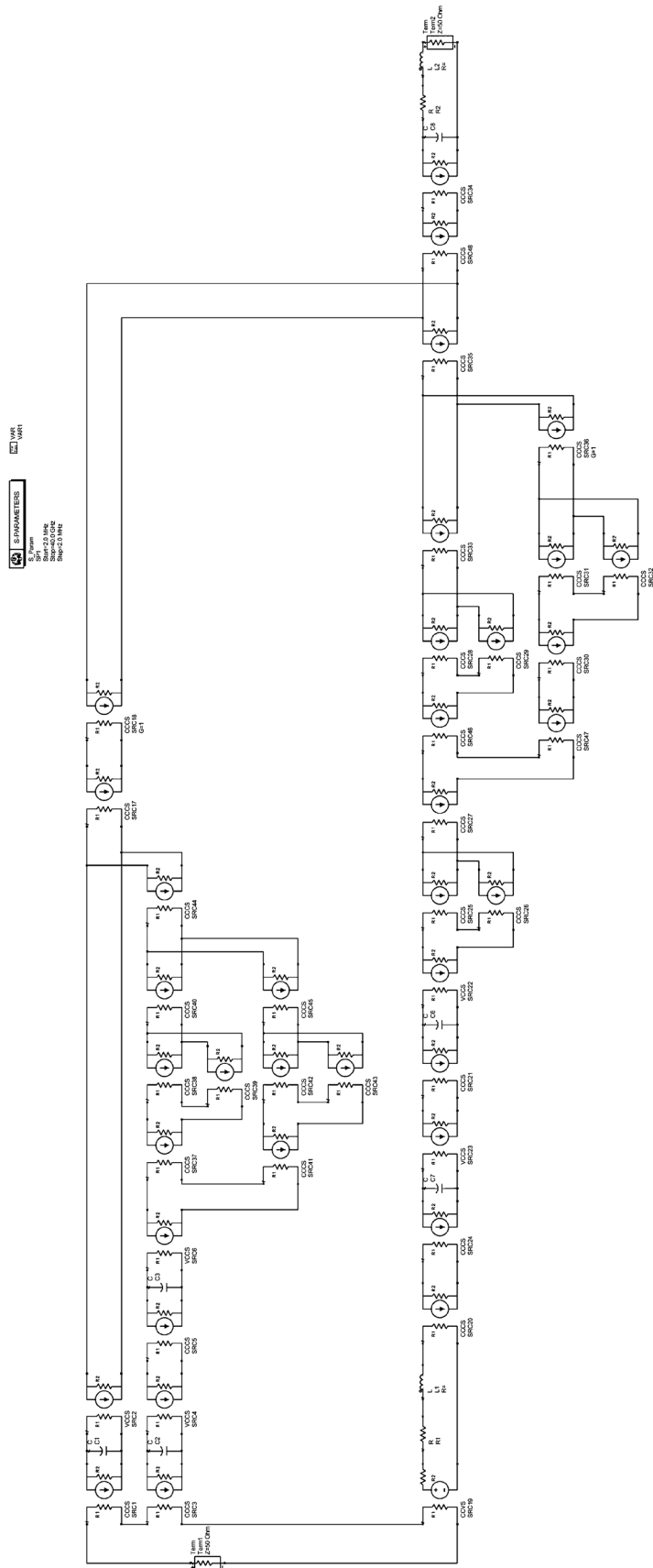


图5 WG-SACM-APD 等效电路图

为  $I_{out}(\omega) = I_{in}(\omega) \cdot 1/(j\omega \cdot z)$ , (20) 式的子系统中的  $1/(z + j\omega)$  可以用图 2(c) 来实现, 用 CCVS 受控源将输入电流转化为电压, 然后电压信号作用于电感  $L$  为 1 和电阻  $R$  为  $z$  的串联电路上, CCCS 循环电路得到电流信号  $I_{out}(\omega) = I_{in}(\omega) \cdot 1/(z + j\omega)$ . 而 (21) 式子系统原理跟 (20) 式一样, 根据

$$I_{out}(\omega) = 1/(z - j\omega) \cdot I_{in}(\omega) \\ = -1/(-z + j\omega) \cdot I_{in}(\omega),$$

仅仅是电阻改成负值. 根据五个典型子系统的子系统框图, 可以得到正入射结构 Si/Ge SACM-APD 的等效电路图如图 3, 电路图包括了寄生电流网络. 同样的方法也可以得到 RCE-SACM-APD 与 WG-SACM-APD 的等效电路图如图 4 和图 5.

### 4. 结果讨论

APD 的带宽主要由载流子渡越时间、RC 常数和雪崩建立时间  $\tau_m$  决定, 下面我们将对这些效应进行相应的讨论.

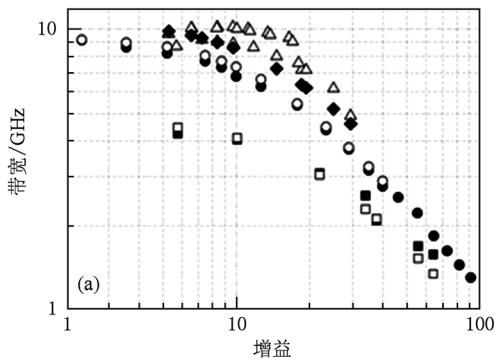


图 6(a) 为不同材料 (三角: APD<sub>1</sub><sup>[20]</sup>; 圆圈: APD<sub>2</sub><sup>[21]</sup>; 方框: APD<sub>3</sub><sup>[22]</sup>) 的 APD 在正入射情况下的增益带宽特性曲线, 图中空心为实验数据, 实心为电路模型模拟的结果, 理论和实验符合得很好. 由于 Si 的  $k$  值小, 尽管 APD 器件结构并不一定是最优的结果, 但基于现有的实验报道, 从图中可以看出, 在一定增益条件下, Si/Ge APD 与其他两种材料 APD 相比, 在带宽上显示了明显的优越性. 正入射结构 APD 一个难以克服的问题是吸收层厚度对带宽和量子效率存在不同影响, 这就使 GBP 受到限制. 为了提高量子效率, 吸收层应该尽量做厚一些, 但吸收层越薄对带宽的提高越有利. 波导结构的 APD 和谐振腔结构的 APD 就解决了正入射结构带宽与量子效率之间的矛盾问题. 图 6(b) 为倍增材料为 InAlAs 的不同结构 APD 的增益带宽曲线图 (圆圈: RCE 结构<sup>[23]</sup>; 三角: WG 结构<sup>[24]</sup>; 方框: 正入射结构), 仿真结果与实验基本一致. 图 6 表明本文中用到的频率响应的等效电路模型是可靠的.

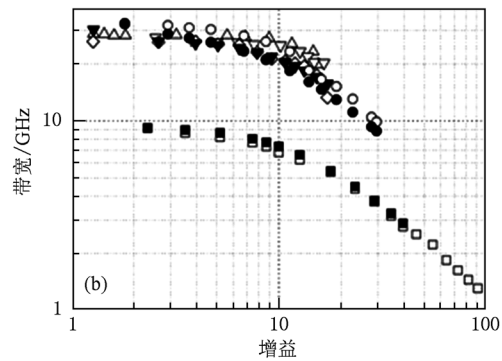


图 6 APD 物理模型与实验的增益带宽特性曲线 (a) 为不同材料 (三角: APD<sub>1</sub><sup>[18]</sup>; 圆圈: APD<sub>2</sub><sup>[19]</sup>; 方框: APD<sub>3</sub><sup>[20]</sup>) 的增益带宽特性曲线; (b) 为倍增材料为 InAlAs 的不同结构 APD 的增益带宽曲线图 (圆圈: RCE 结构<sup>[21]</sup>; 三角: WG 结构<sup>[22]</sup>; 方框: 正入射结构)

图 7 描述了不同材料的 APD 在不同光敏面直径下的增益带宽曲线 (实心: 直径为 20  $\mu\text{m}$ ; 空心: 直径为 40  $\mu\text{m}$ ), 根据 (16) 式, 光敏面面积增大电容增大, 从而 RC 常数增大, 导致带宽减小. 图 7 可以看出, 在低增益区 APD 带宽随直径发生明显变化; 随着增益增加, 面积对带宽的影响逐渐减小. 这种现象的原因可能是在低增益区, APD 的带宽主要由 RC 常数和渡越时间限制, 随着增益增加 (APD 反向电压增加), 雪崩建立时间成为影响带宽的主要因素.

APD 的带宽跟吸收层的厚度有着密切的关系. 图 8 描述了 Si/Ge RCE-SAGCM-APD 吸收层厚度的

改变对带宽的影响, 从图中, 我们可以看出在低增益区, 带宽随着吸收层厚度的增大而减小. 在高增益区, 增益带宽乘积变成一个常数. 这是因为在低增益区, 带宽主要由 RC 常数和载流子渡越时间决定, 当增大吸收层厚度时, 相应的载流子渡越时间就增大, 带宽就变小. 高增益区, 影响带宽的主要因素是雪崩建立时间  $\tau_m$ , 而倍增区的厚度没有改变, 所以雪崩建立时间没有变, 根据公式  $f_{3dB} \cdot M = 1/2\pi\tau_m$ , 所以增益带宽乘积不变.

在 APD 封装过程中, APD 芯片一般都是用金丝与其他设备相连, 我们可以把金丝等效为一个电



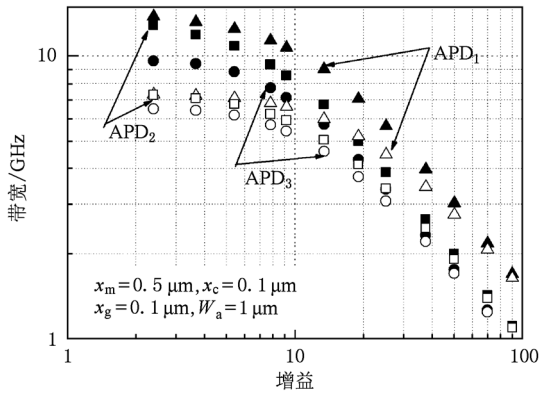


图7 不同材料的 APD 在不同光敏面直径下的增益带宽曲线 (实心:直径为 20 μm;空心:直径为 40 μm)

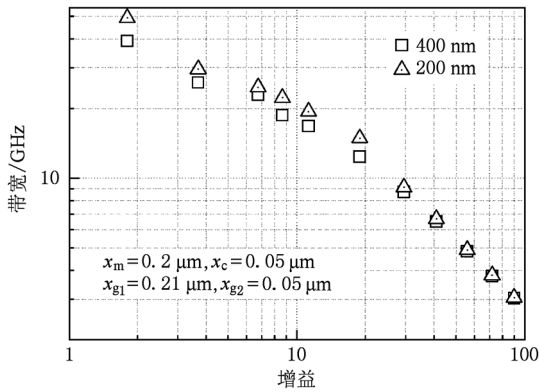


图8 Si/Ge RCE-SAGCM-APD 吸收层厚度的改变对带宽的影响

感. 对于影响 APD 带宽的寄生参数中的寄生电感包括焊盘的电感和金丝的电感. 如图9,我们将金丝的电感考虑到 Si/Ge-SACM-APD 中,可以看到在  $M = 10$  时,APD 在不同电感下的频响特性. 当电感从

0 nH 变到 1 nH,带宽逐渐变大. 但是当电感再变大的时候,带宽却变小. 而且谐振峰所在的位置越来越靠近低频段,并且其最大值变大. 这些都是由于寄生电感和寄生电容的谐振效应. 这一现象表明我们可以通过采用封装技术,利用谐振效应,在一定程度上对带宽进行补偿<sup>[25]</sup>.

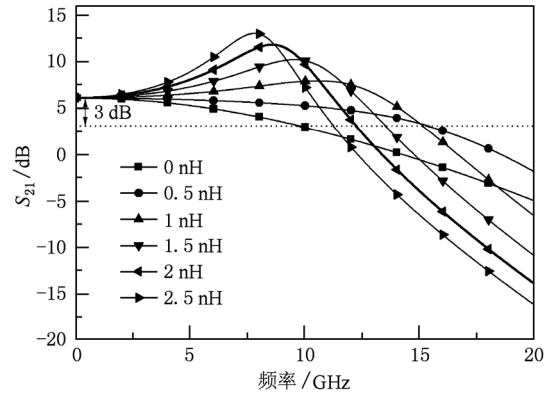


图9 Si/Ge SACM-APD 不同电感下的频响曲线

## 5. 结 论

本文系统研究了正入射、波导型和谐振腔型 APD 和不同倍增材料包括 InP/InGaAs, InAlAs/InGaAs 和 Si/Ge APD 的频率响应特性. 仿真的结果表明 Si/Ge APD 与其他两种材料 APD 相比,显示了明显的优越性. 本文所建立的电路模型可以直接应用在电路模拟软件中,相比一般 APD 的简单模型,该模型更接近 APD 的实际性能,对 APD 的结构优化具有指导意义.

[1] Campbell J C, Holden W S, Qua G J, Dental A G 1985 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **QE-21** 1743  
 [2] Campbell J C, Johnson B C, Qua G J, Tsang W T 1989 *J. Lightw. Technol.* **7** 778  
 [3] Campbell J C, Tsang W T, Qua G J, Johnson B C 1988 *IEEE J. Quant. Electron.* **24** 496  
 [4] Lenox C, Nie H, Yuan P, Kinsey G, Homles A L Jr, Strectman B G, Campbell J C 1999 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **11** 1162  
 [5] Kang Y M, Liu H D, Morse M, Paniccia Mario J, Zadka M, Litski S, Sarid G, Pauchard A, Kuo Y H, Chen H W 2008 *Nature Photonics* **247** 1  
 [6] Xue H Y, Xue C L, Cheng B W 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2542  
 [7] El-Batawy Y M, Deen M J 2003 *IEEE Trans. Electron Devices* **50**

790  
 [8] El-Batawy Y M, Deen M J 2005 *IEEE Trans Electron Devices* **52** 335  
 [9] Banoushi A, Kardan M R, Ataee Naeini M 2005 *Solid State Electron.* **49** 871  
 [10] Wang G, Tokumitsu T, Hanawa I, Sato K, Kobayashi M 2002 *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett* **12** 378  
 [11] Wang G, Tokumitsu T, Hanawa I, Yoneda Y, Sato K, Kobayashi M 2003 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **51** 1227  
 [12] Mai Y X, Wang G 2009 *J. Lightw. Technol.* **27** 1197  
 [13] Jiayin Wu, Wang G 2010 *Journal of Lightwave Technology* **28** 784  
 [14] Chen W, Liu S 1996 *IEEE J. Quantum Electron* **32** 2105

- [15] Zarifkar A, Soroosh M, 2004 *Proc. LFNM 6th Int. Conf. Laser and Fiber-Optical Networks Modeling*, Sep. 6—9 213
- [16] Dai D X, Chen H W, Bowers J E, Kang Y M, Morse M, Paniccia M J 2010 *Phys. Status Solidi C* **7** 2532
- [17] Dai D X, Chen H W, Bowers J E, Kang Y M, Morse M, Paniccia M J 2009 *Optics Express* **17** 16549
- [18] Oppenheim V, Willisky A S, Young I T 1983 *Signals and Systems*, 1st ed., Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall
- [19] Irwin J D 2002 *Basic Engineering Circuit Analysis*. 1st ed. (New York: Wiley) p274
- [20] Kang Y, Zadka M, Litski S, Sarid G, Morse M, Paniccia M J, Kuo Y H, Bowers J, Beling A, Liu H D, McIntosh D C, Campbell J C, Pauchard A 2008 *Optics Express* **16** 9365
- [21] Ning D, Wang S, Zheng X G, Li X, Ning L, Campbell J C, Chad W, Coldren L A 2005 *IEEE J. Quantum Electron* **41** 568
- [22] Kim D S, Lee S Y, Lee J H, Oh G S, Kim N J, Lee J W, Kim A S, Sin Y K 1996 *Conf. Proc. IEEE Laser and Electro-Optics society Annu. Meet.* **2** 332
- [23] Nie H, Anselm K A, Lenox C, Yuan P, Hu C, Kinsey G, Streetman B G, Campbell J C 1998 *IEEE Photonics Technology Letters* **10** 409
- [24] Kinsey G S, Campbell J C, Dentai A G 2001 *IEEE Photonics Technology Letters* **13** 842
- [25] Zhu N H, Liu Y, Zhang S J, Wen J M 2006 *Microwave Opt. Tech. Lett.* **48** 76

## Frequency responses of communication avalanche photodiodes \*

Mo Qiu-Yan Zhao Yan-Li<sup>†</sup>

(*Optoelectronic Science and Engineering of Huazhong University of Science, National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China*)

(Received 20 April 2010; revised manuscript received 2 September 2010)

### Abstract

In recent years, separate absorption, charge and multiplication avalanche photodiodes (SACM-APDs), including InP/InGaAs, InAlAs/InGaAs and Si/Ge APD, have drawn a lot of attention in the field of optical communication. In this paper, on the basis of the circuit model, the frequency response is studied systematically for APDs with different thicknesses of epitaxial layers, different multiplication materials and device structures. The effects of the absorption layer thickness, the dimension of the active area and the parasitic parameters on frequency response are addressed to Si/Ge APD. The simulation results are in good agreement with the experimental results, which indicates that the circuit model is helpful for the design optimization of APDs.

**Keywords:** SACM-APD, circuit model, frequency response

**PACS:** 29.40.Cs, 42.79.Sz, 42.79.-e

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2008AA01Z207), the Natural Science Foundation of Hubei Province, China (Grant No. 2010CDB01606), the Research and Innovation Plan of Huawei Company, China (Grant No. YJCB2010032NW), and the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: yanlizhao@mail.hust.edu.cn