

# 基于等效电路模型的 APD 特性分析

崔洋<sup>1</sup>, 孙华燕<sup>1</sup>, 齐莹莹<sup>2</sup>

(1. 装备学院, 北京 101416; 2. 西安卫星测控中心, 西安 710000)

**摘要:**为探究雪崩光电探测器(APD)的特性,采用APD等效电路模型模拟雪崩光电探测器的特性;通过对APD载流子速率方程、暗电流、噪声电流以及各寄生参量等方面的研究,得到了APD的等效电路模型,基于该电路模型在PSpice软件中分析了APD的光电流和暗电流与反向偏压的关系、脉冲响应特性、频率响应特性、噪声电流特性、不同入射光功率下的光电特性以及光电流与接受光强度的关系。

**关键词:**雪崩光电探测器;等效电路模型;脉冲响应特性;噪声电流特性

中图分类号:TN471

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2013)08-0127-04

## Analysis of APD Characteristics Based on Equivalent Circuit Model

CUI Yang<sup>1</sup>, SUN Hua-yan<sup>1</sup>, QI Ying-ying<sup>2</sup>

(1. Academy of Equipment, Beijing 101416, China; 2. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** In order to explore the characteristics of the avalanche photodetector (APD), the paper uses the equivalent circuit model of APD to simulate the characteristics of avalanche photodiode detector. Through the study of carrier rate equation, dark current, noise current and parasitic parameters etc. The paper obtained the equivalent circuit model of the APD, and carried on some analyzes using this model and the PSpice software to the relationship of light and dark current with reverse voltage, the impulse response characteristics and the frequency response characteristics, the noise current characteristics, the Electro-optical characteristics with different incident light power, and the relationship between photocurrent and the intensity of the received light.

**Key words:** avalanche photodetector; equivalent circuit model; impulse response characteristic; noise current characteristics

光电探测器件是激光主动探测接收系统的关键元件。雪崩光电二极管 APD 作为光电探测系统的重要组成部分,其性能的优劣对于系统的整体性能有着至关重要的影响<sup>[1]</sup>。而 APD 的性能往往又受到其工作条件以及后续匹配电路的影响,如何更好的模拟 APD 的各项参数,能够对提高其使用性能以及设计后续匹配电路提供参考依据。实际对 APD 性能的仿真主要采用以数值分析和等效电路模型两种,由于内部参数较多,因此采用数值计算的方式得出的 APD 性能往往不够全面<sup>[2-3]</sup>。而采用等效电路模型对 APD 进行仿真,能够更好的模拟 APD 的性能,并且为后续匹配电路设计中直接使用 APD 模块提供了方便。

## 1 等效电路模型的建立

APD 的结构示意图如图 1 所示,其 P 区和 N 区都进行了重掺杂,并在 I 层和 P 层引入另一层 P 区作为碰撞电离区。此种结构的设计,使 APD 能够承受很高的反向偏压,并在 PN 结的内部形成一个高电场区。

依据 APD 内部电场的分布和平均雪崩增益的表达式,可以从 APD 的载流子速率方程、噪声电流、暗电流和寄生参量 4 部分建立其等效电路模型。

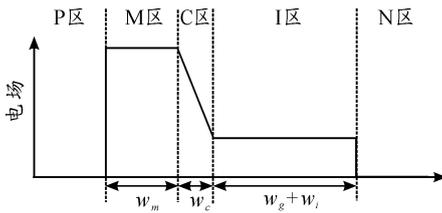


图1 APD结构示意图

### 1.1 载流子速率方程

为了模拟 APD 的光电特性,首先需要研究光电流的来源。由于 InGaAs/InP 材料的 APD 由空穴碰撞电离产生增益,且碰撞电离产生的电子、空穴数量相等,所以在 I 区和 M 区都以空穴为研究对象得到 APD 的载流子速率方程:

$$\frac{dP_i}{dt} = G_i - \frac{P_i}{\tau_{ipr}} - \frac{P_i}{\tau_{ipt}} \quad (1)$$

$$\frac{dP_m}{dt} = -\frac{P_m}{\tau_{mpr}} - \frac{P_m}{\tau_{mpt}} + (\beta_e v_{mn} + \beta_h v_{mp})P_m + \frac{I_{ip}}{q} \quad (2)$$

式(1)、式(2)分别为 I 区和 M 区的载流子速率方程,其中,  $P_i$  分别为 I 区和 M 区过剩空穴总数,  $\tau_{ipr}$ 、 $\tau_{mpr}$  为 I 区和 M 区空穴复合寿命,  $\tau_{ipt}$ 、 $\tau_{mpt}$  为 I 区和 M 区空穴渡越时间,  $G_i$  为 I 区的电子-空穴对产生率,  $I_{ip}$  为 I 区空穴在电场作用下的漂移电流,  $\beta_e$ 、 $\beta_h$  分别为 M 区内电子和空穴的碰撞电离率,  $v_{mn}$ 、 $v_{mp}$  分别为 M 区内电子和空穴的漂移速率。

为将式(1)、式(2)变换为电路方程的形式,引入一个归一化常数  $C_{no}$ ,这个常数可以看做电容,令  $V_m = qP_m/C_{no}$ ,  $V_i = qP_i/C_{no}$ ,则式(1)、式(2)可化:

$$\frac{P_{in}}{V_{oi}} = C_{no} \frac{dV_i}{dt} + \frac{V_i}{R_{ipr}} + \frac{V_i}{R_{ipt}} \quad (3)$$

$$I_m + I_{ip} = C_{no} \frac{dV_m}{dt} + \frac{V_p}{R_{mpr}} + \frac{V_p}{R_{mpt}} \quad (4)$$

### 1.2 暗电流的实现

光探测器芯片在没有光照的条件下也会有暗电流存在,暗电流是一种噪声信号,因此有必要在等效电路模型中对暗电流特性进行模拟。光探测器的暗电流包括扩散电流、表面电流、产生复合电流、隧穿电流和欧姆电流,在低反向偏压条件下,APD 的暗电流以产生复合电流和欧姆电流为主,在高反向偏压条件下,暗电流以隧穿电流为主,因此其表达式可以写成下面的形式:

$$I_d = I_{gr} + \frac{V}{R_j} + \frac{\Theta_{1i}AVM}{E_i} \exp(-\Theta_{2i}E_i) + \frac{\Theta_{1m}AVM}{E_m} \exp(-\Theta_{2m}E_m) \quad (5)$$

式中:  $V$  为反向偏压;  $R_j$  为结电阻;  $A$  为 APD 的结面积;  $M$  为平均雪崩增益;  $E_i$  和  $E_m$  分别为 I 区和 M 区的电场。

### 1.3 噪声的实现

APD 的雪崩倍增过程是一个复杂的随机过程,必将引起散粒噪声,其噪声电流可表示:

$$I_n = \sqrt{2q(I_p + I_d)M^2F(M)\Delta f} \quad (6)$$

式中,  $F$  为 APD 的过剩噪声因子,其表达式如下:

$$F(M) = k_A M + (1 - k_A)(1 - 1/M) \quad (7)$$

对于 InGaAs/InP 材料的 APD,空穴电离速率大于电子电离速率,即  $\beta_h > \beta_e$ ,其雪崩效应是由空穴电流的注入引起的,所以取  $k_A = \beta_e/\beta_h$ 。  $M$  为雪崩倍增因子,是一个统计平均值。

### 1.4 寄生参量

APD 芯片寄生部分可用电学元件  $C_j$ 、 $R_j$  和  $R_s$  表示。  $C_j$  为结电容,其表达式为  $C_j = \epsilon_0 \epsilon_s A/W_j$ ;  $R_j$  为结电阻它可以使得模型在较低频率下与实际的器件拟合的更好,而在高频情况下,  $R_j$  将会被电容  $C_j$  短路;  $R_s$  为芯片的串联电阻,包括体电阻和欧姆接触电阻等。

APD 封装寄生部分来源于封装过程中的载体和金丝,可用电子学元件  $C_p$ 、 $R_p$  和  $L_p$  表示。其中  $C_p$  为芯片电极焊盘和载体引入的并联寄生电容,该电容将对光电流进行分流,特别是对高频信号,分流的结果导致高频响应信号幅度下降;  $R_p$  为封装引入的寄生电阻;  $L_p$  为金丝引线电感,由于金丝呈感性,阻碍了高频光电流的输出,也将导致高频响应信号幅度的下降。

### 1.5 APD 等效电路模型

通过以上分析并考虑寄生参量的影响,建立 APD 光电探测器芯片的等效电路模型如图 2 所示。APD 等效电路模型模拟基本参数如表 1 所示。

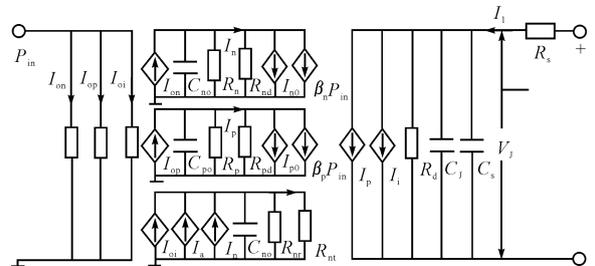


图2 APD 等效电路模型

表1 APD 等效电路模型参数

$A/\mu\text{m}$	$\omega_i/\mu\text{m}$	$\omega_n/\mu\text{m}$	$\omega_p/\mu\text{m}$
2 500	55	1.88	1.88
$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha_i/(m^{-1})$	$\alpha_n/(m^{-1})$	$\alpha_p/(m^{-1})$
1.06	27	50	50
$V_{bi}/V$	$\nu_{sp}/(cm \cdot s^{-1})$	$\nu_{sn}/(cm \cdot s^{-1})$	$a_n/(cm^{-1})$
1.56	$10^5$	$10^5$	$5.7 \times 10^8$
$b_n/(cm^{-1})$	$c_n/(cm^{-1})$	$a_p/(cm^{-1})$	$b_p/(cm^{-1})$
$1.7 \times 10^8$	1	$5.3 \times 10^8$	$2.7 \times 10^8$
$c_p/(cm^{-1})$	$\tau_p/ns$	$\tau_n/ns$	$\tau_{nr}/ns$
1	2	0.5	2
$R_d/\Omega$	$C_s/F$	$R_s/\Omega$	$C_{no}/F$
$1 \times 10^{14}$	$1 \times 10^{-14}$	1	$1 \times 10^{-12}$

## 2 等效电路模型的模拟与分析

根据建立的 APD 等效电路模型,在 PSpice 中建立仿真模块对 APD 基本特性进行仿真分析。

### 2.1 光电流、暗电流与反向偏压的关系

APD 在反向偏压条件下能够把入射光信号转变为光电流的形式输出,而暗电流是探测器的一种噪声电流,其大小是衡量探测器性能的一个重要指标。在建立的等效电路模型中也引入了暗电流,图 3 给出了 PSpice 软件中 APD 的光电流与暗电流随反向偏压的变化曲线。

从图 3 中可看出当反向偏压小于 70 V 时,光电流缓慢增加,随着偏压的升高,由于雪崩效应的出现,光电流迅速增大,光电转换效率明显提高,可以探测到更加微弱的信号;偏置电压较小时,暗电流以扩散电流和寄生漏电流为主,当偏压较高出现雪崩效应时,暗电流主要以隧穿电流为主;该器件的击穿电压约为 80 V。

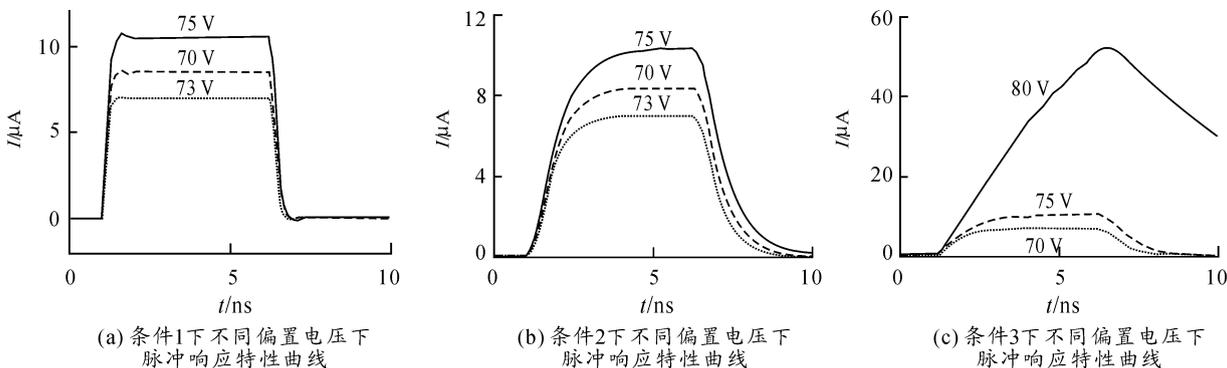


图 3 光电流、暗电流与反向偏压的关系

### 2.2 脉冲响应特性

脉冲响应特性能够从时域上反映出光电探测器的高速特性,通过研究 APD 的脉冲响应特性可以分析出脉冲波形失真情况以及失真的原因<sup>[4]</sup>。等效电路模型采用瞬态分析,采用 1  $\mu\text{V}$  来模拟 1  $\mu\text{W}$  的入射光功率,对偏置电压分别为 70 V、73 V、75 V 下进行仿真分析,如图 4 所示。

图 4(a)是对脉宽为 5 ns,延迟时间 1 ns,上升时间 200 ps,下降时间 300 ps,周期为 10 ns 的脉冲进行仿真的结果。可见在正常的工作电压下,APD 有很好的脉冲响应特性,随着反向偏压的增大,输出光电流的响应幅度逐渐增大,可以看出在 75 V 的反向偏压下,APD 的响应度约为 10 A/W。图 4(b)是对脉宽为 0.5 ns,延迟时间 0.1 ns,上升时间 20 ps,下降时间 30 ps,周期为 1 ns 的脉冲进行仿真的结果。可见此时受 APD 频率响应特性的影响,输出的脉冲已经有了一些变形。图 4(c)是对反向偏压分别为 70 V、75 V 和 80 V 下 APD 的脉冲响应特性进行的仿真结果。可见,当反向偏压约为 80 V 时,由于 APD 的雪崩击穿效应,使得该器件测试已经不能响应这样短的脉冲了。

### 2.3 频率响应特性

频率响应特性是从频域上反映了光电探测器的高速性能。电路设置为交流扫描方式,输入信号峰值电压设为 1  $\mu\text{V}$ ,用来模拟 1  $\mu\text{W}$  的输入光信号。分别对反向偏压为 70 V、73 V 和 75 V 情况下 APD 的频率响应特性进行仿真,结果如图 5 所示。

从图 5 可见 APD 的 3 dB 带宽随反向偏压增加而降低,70 V 是约为 1.766 GHz,73 V 时约为 1.448 GHz,75 V 时约

为 1.250 GHz。因此在使用 APD 的过程中,可以通过调节反向偏压的大小,来得到适当的频率响应带宽。同时,从图中还可以看到随着反向偏压的升高,APD 的响应幅度变大,这表明不能同时得到较大的带宽和响应幅度。因此在使用时要兼顾带宽和增益特性来选择合适的的工作电压。

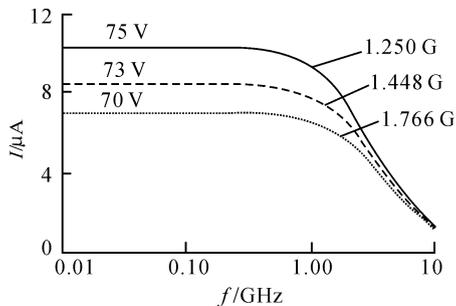


图 5 不同反向偏压下频率响应特性

### 2.4 噪声电流特性

噪声性能是鉴别光电探测器性能优劣的重要指标,对于有内部增益的雪崩探测器,散粒噪声是其主要噪声<sup>[6]</sup>。为了模拟不同光功率下的 APD 的噪声电流值,采用直流扫描分

析,直流电源取值分别为  $0.1 \mu\text{V}$ 、 $1 \mu\text{V}$ 、 $10 \mu\text{V}$ ,分别模拟  $0.1 \mu\text{W}$ 、 $1 \mu\text{W}$ 、 $10 \mu\text{W}$  的回波功率。得到的 APD 散粒噪声电流随反向偏压变化的曲线如图 6 所示。

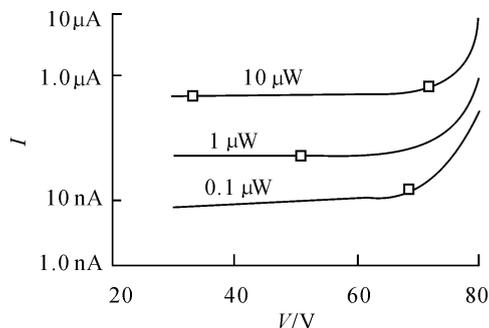


图 6 噪声电流特性曲线

从图 6 中可以看出探测器输出的噪声电流随入射光功率的增大而增大,这主要是由于 APD 的噪声电流的均方值与光生电流的大小成正比。随着反向偏压的增大,噪声电流也随之增大,当反向偏压达到  $80 \text{ V}$  时,其值迅速增大,造成该现象的原因是反向偏压接近雪崩击穿电压,光电流急剧上升,随之引起了噪声电流的变化。

### 2.5 不同入射光功率下的光电特性

采用直流扫描方式仿真 APD 的光电流与入射光强度之间的关系。偏执电压作为扫描参量设置为从  $30 \sim 80 \text{ V}$ ;直流电源分别设置为  $1 \mu\text{V}$ 、 $10 \mu\text{V}$  和  $100 \mu\text{V}$ ,用来模拟  $1 \mu\text{W}$ 、 $10 \mu\text{W}$  和  $100 \mu\text{W}$  的入射光功率,当直流电源设置为  $0 \text{ V}$  时,模拟无光输入时的暗电流特性。不同入射光功率下 APD 的输出光电流随反向偏压的变化如图 7 所示。

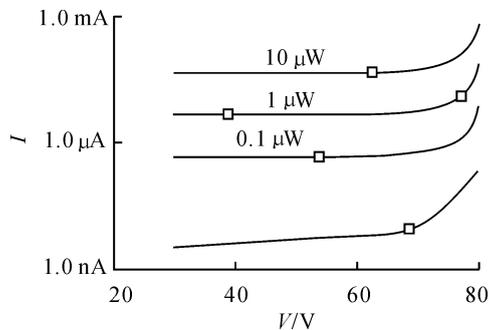


图 7 不同入射光功率下的光电特性曲线

从图 7 中可以看出 APD 输出的光电流随入射光功率的增加而增加。

### 2.6 光电流与接受光强度的关系

采用直流扫描方式仿真 APD 的光电流与入射光强度之间的关系,偏执电压设置为  $75 \text{ V}$ ,扫描参量设置为从  $1 \text{ nV} \sim 1 \mu\text{V}$ ,用来模拟  $1 \mu\text{W}$  到  $1 \text{ mW}$  的回波光功率。光电流随入射光强度的变化关系如图 8 所示。

从图 8 中可以看出 APD 在合适的工作电压下增益稳定,在较大的范围内线性度好。

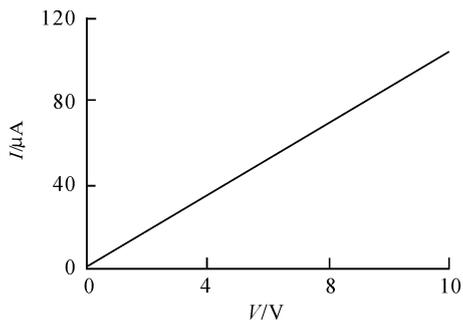


图 8 光电流与接受光强度关系曲线

## 3 结束语

本文基于对雪崩管的工作原理和性能参数的分析,建立了一种新的 APD 的等效电路模型,该模型从载流子速率方程出发,引入了暗电流、噪声电流和寄生效应,能够精确反映探测器的性能。而通过对建立的 APD 模型的仿真分析,验证了该模型在对 APD 性能仿真的有效性和可靠性。同时通过对探测器基本性能的仿真,对于更深入了解探测器的光电特性,优化探测器的使用特性提供了参考意义。另外,通过建立的模型,能够更加全面的对回波探测过程进行模拟仿真,以及后续电路的设计分析。

## 参考文献:

- [1] 江月松,阎平,刘振玉. 光电技术与实验 [M]. 北京:北京理工大学出版社,2011.
- [2] Abbasi M, Sheikhi M, Zarifkar A. Implementation of split step method to consider gradual changes of the electric field for circuit simulation of an avalanche photo detector [C]// Proc 3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, 2008:1-6.
- [3] CHEN W, LIU S. IN avalanche photodiodes model for circuit simulation [J]. IEEE J Quantum Electron, 1996, 32 (12):2105-2111.
- [4] 许文彪,陈福深,陈苗,等. 基于等效电路模型的雪崩光电探测器特性分析 [J]. 半导体光电, 2011, 32(3):336-338.
- [5] Leheny R, Nahory R, Pollack M, et al. Characterization of InGaAs photodiodes exhibiting low dark current and low junction capacitance [J]. IEEE J Quantum Electron, 1981, 17(2):227-231.
- [6] Anselm K. Performance of thin separate absorption charge and multiplication avalanche photodiodes [J]. IEEE J Quantum Electron, 1998, 34:482-490.
- [7] 郭赛,丁全心,羊毅. 雪崩光电探测器的噪声抑制技术研究 [J]. 电光与控制, 2012, 19(3):69-73.
- [8] 宋丰华. 雪崩光电探测器最佳噪声分配方法研究 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2004, 15(2):84-88.
- [9] 王江涛,陈向宁. a-Si:H/FLC 光寻址液晶光阀性能研究 [J]. 四川兵工学报, 2011(3):127-129.