

# 低温下 EMCCD 电子倍增模型

胡 泊, 李彬华

(昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南昆明 650500)

**摘 要:** 了研究低温下电子倍增 CCD(EMCCD)的电荷倍增特性,根据电子碰撞电离原理,建立了电离率模型;并依据雪崩倍增积分关系,针对所分析的 EMCCD 器件,建立了其低场强的倍增模型.通过倍增模型的理论计算结果与 TI 公司提供的实际器件 TC285SPD 和 TC253SPD 的倍增曲线比较,说明所提出模型的数据能够很好地拟合实际的倍增曲线.该模型可以方便地计算在固定栅极电压下的电子信号通过多级级联电子倍增寄存器后的总增益,进而可用于 EM-CCD 相机的增益调整和校正.

**关键词:** 半导体器件; 电荷耦合元件 (CCD); 低温; 电子倍增; 电离率; 数学建模

**中图分类号:** TN29 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)09-1826-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.025

## Electron Multiplication Model of EMCCD in Low Temperature

HU Po, LI Bin-hua

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

**Abstract:** To study the charge multiplying characteristic of an electron multiplying charge-coupled device(EMCCD), an ionization rate model is presented based on the impact-ionization theory. Aiming at two TI IMPACTRON EMCCD devices, we develop a multiplication model at low fields using avalanche multiplication integral formula. Compared with the multiplication curves on the datasheets of both devices of TC285SPD and TC253SPD, the calculated data from the model are taken as a reasonable fit to the actual curves. A method is put forward to predict the amounts of signal passing through the multi-stage cascaded electron multiplication register containing a fixed-voltage gate, which is useful to adjust and correct the gain of EMCCD devices. The model is suitable for lower temperature environment, in which electron-multiplication technology can be applied to photon counting strategies.

**Key words:** semiconductor devices; charge-coupled device(CCD); low temperature; electron multiplication; ionization coefficient; mathematic model

## 1 引言

电子倍增 CCD(EMCCD)技术是一种全新的微弱光信号增强探测技术<sup>[1]</sup>,该技术是在读出寄存器之后和读出放大器之前插入一个电荷倍增寄存器(CCM),不仅可以获得与像增强 CCD(ICCD)一样的单光子探测能力<sup>[2~4]</sup>,而且还减小了倍增器件工作电压,最高驱动电压约 40~50V.同时还具有高分辨率、高读出速度、低噪声等诸多优点,特别适合于曝光时间在毫秒及其以上量级的微光成像领域.

自本世纪初电子倍增 CCD 问世以来,EMCCD 在技术和应用上都得到了较快的发展,从而使微光成像技术从真空电子图像增强时代向全固态图像增强时代跨越

式发展.2000 年,英国 e2v 公司推出了自己的 EMCCD 芯片,其生产的 CCD65 首次使用 L3CCD 技术,在 50Hz 高增益模式下能有效控制读出噪声小到 1 个电子 rms 以下<sup>[5]</sup>.2001 年,美国德州仪器公司(Texas Instrument)公司推出了 IMPACTRON™技术<sup>[6]</sup>,其中 TC253 和 TC285 系列采用帧转移和 TI 独有的分离栅虚相 CCD(SGVPCCD)技术,适用于高速读出场合.由于 EMCCD 具有较高且可控的电子倍增增益,在一定的倍增增益下,可以使读出噪声减小到接近于零,从而为光子计数提供了可能<sup>[7]</sup>.

半导体器件工作时的热噪声,成为 EMCCD 光子计数技术实现道路上的一个障碍.在天文研究领域,通常采用深度制冷方法使 EMCCD 器件工作在非常低的温度下,例如 Andor 公司生产的科学级相机 iXon 系列相机

的最大制冷深度可达-95℃或-100℃.要实现光子计数,必须研究低温情况下的 EMCCD 特性,特别是电荷倍增特性.本文根据 TI 公司生产的 EMCCD 器件 TC285SPD 和 TC253SPD 的电子倍增结构,深入分析其电子倍增机理,提出了量化电子倍增增益的数学模型,通过数值分析验证了该模型.

## 2 EMCCD 的倍增结构及工作原理

EMCCD 是在传统的 CCD 结构基础上,在移位寄存器末端和输出放大器间插入一个信号电荷载流子倍增寄存器(CCM),如图 1 所示.CCM 的第二相由 2 个电极组成:FP 极保持固定电势(1.5V),电荷倍增栅极(CMG)加有高压时钟脉冲.假设  $W$  为 FP 与 CMG 两极在电荷传输方向上的间隙,该区域会形成高强电场,使得转移过来的载流子在该区域加速获得足够能量,达到或超过碰撞电离阈值能量的载流子将发生碰撞电离产生新的电子-空穴对.由于在同样的场强下,电子电离率远大于空穴的电离率,因此 EMCCD 均采用电子作为有效载流子信号<sup>[8]</sup>.新产生的电子汇入信号电荷,空穴则被衬底吸收.

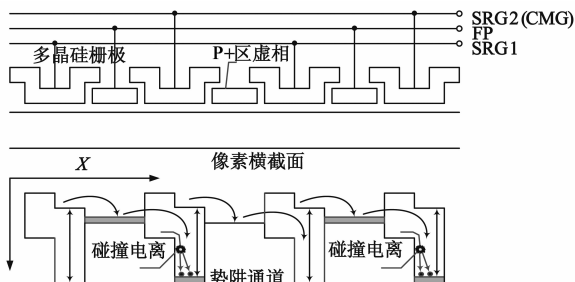


图1 EMCCD的倍增结构

当电子经电场加速后,发生碰撞电离,引起电子雪崩倍增.其增益与电离率的关系<sup>[9]</sup>为

$$1 - \frac{1}{M_n} = \int_0^W \alpha \exp\left(-\int_0^x (\alpha - \beta) dx'\right) dx \quad (1)$$

式中  $M_n$  为电子倍增增益,  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为电子和空穴的电离率,  $W$  为倍增间距.在  $W$  内分布着不均匀的电场,使电子加速并促使其发生碰撞电离.对于单级倍增区域,  $M_n$  即为电子信号通过一个倍增间隙  $W$  后的倍增系数,由此可得到电子作为入射载流子的单级倍增率

$$r = \frac{1}{1 - \int_0^W \alpha \exp\left(\int_w^x (\alpha - \beta) dx'\right) dx} \quad (2)$$

在 EMCCD 倍增区内,电子碰撞电离后产生新的电子-空穴对.新生成的电子作为 2 次电子,被纳入到信号电荷包中.而新生成的空穴立即被低电势衬底吸收,不再参与后续的碰撞电离过程.该分析过程为单级倍增模型,实际电子倍增 CCD 器件为  $N$  级级联实现信号倍增,如 TC253SPD 和 TC285SPD 均为 400 级.

根据 Thornber 对电子和空穴的研究结论知<sup>[10]</sup>,当电场场强  $E$  为 200kV/cm 时,电子电离率大约是空穴电离率的 10 倍,并且场强越小,二者相差更大.所以在低场强条件下,由于 EMCCD 倍增间距在微米量级,假定电场恒定,那么单级倍增率可以简化为<sup>[8]</sup>

$$r \approx \exp(a_n W) \quad (3)$$

根据上式可得到  $N$  级级联系统的总增益

$$M \approx r^N = \exp(N a_n W) \quad (4)$$

## 3 EMCCD 电子倍增模型

由 EMCCD 工作原理可知,发生在 EMCCD 器件电荷倍增寄存器中的电荷倍增过程,其物理机制是硅半导体器件内部载流子的碰撞电离.因此,讨论 EMCCD 的电荷倍增模型,必须先讨论碰撞电离率模型.

### 3.1 电离率模型

鉴于半导体器件的广泛应用,国内外很多学者对在不同条件下半导体器件的碰撞电离率进行了研究.在一定的场强作用下,载流子可从电场中获得足够高的能量发生碰撞并电离.场强越高载流子越容易电离.在碰撞电离过程中,能引起碰撞电离的载流子必须超过一定的阈值能量  $\epsilon_T$ .电离率  $\alpha$  的大小正比于能量超过阈值能  $\epsilon_T$  的电子数.然而,当温度升高,晶格散射增强,会阻碍对载流子的加速.因此,电离率通常随温度的升高而下降. Grant 基于经验式建立了高场强 ( $2.0 \times 10^5 \text{ V/cm} < E < 7.7 \times 10^5 \text{ V/cm}$ ) 下的电离率数学模型<sup>[9]</sup>,并在室温下通过实验验证其模型.在此基础上,他提出了与温度相关的电离率模型.该模型表明在高场强下,电离率对温度变化敏感度下降. Thornber 通过总结前人的研究成果,首次提出了适合所有场强的电离率模型<sup>[10]</sup>.根据场强范围,可将该模型演变为三种不同模型,分别为热扩散模型、Shockley 低场强幸运漂移模型和 Wolff 高场强多次碰撞电离模型.

南京理工大学近程高速目标探测技术实验室相关研究人员对 EMCCD 特性做了比较深入的研究<sup>[8,11]</sup>.其中,张灿林和陈钱等人使用 Wolff 碰撞电离模型和 Grant 提供的参数建立了 EMCCD 电子倍增数学模型,并通过 TI 公司的 EMCCD 产品 TC247SPD 来验证模型的可靠性,结果表明理论计算值和实际器件倍增曲线吻合较好<sup>[8]</sup>.但是这些电离率模型只能提供室温(300K)下半导体器件的碰撞电离倍增特性,或者预测高温下倍增增益.

然而有些特殊的应用,如天文光子计数成像,需要将 EMCCD 器件置于低温环境下工作.此时,器件的暗电流会更小,信噪比会更高,成像效果更好.所以建立低温、适中场强的 EMCCD 倍增模型,可以进一步扩展

EMCCD 的应用领域.

为此,我们采用 Valdinoci 所提出的电离率模型<sup>[12]</sup>

$$\alpha(E,T)=\frac{E}{a(T)+b(T)\exp(g(E,T))}\tag{5}$$
$$g(E,T)=\frac{d(T)}{c(T)+E}$$

式中  $E$  是电场强度,  $T$  是晶格温度,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  是与温度有关的参数.

参数  $a$  在相对的低场强下对电离率的影响很微弱,可以忽略不计,即可省去.但在较高的场强下,  $a$  则不可省去.  $b$  为常数.根据 Susanna Reggiani<sup>[13]</sup>给出  $c$ 、 $d$  表达式如下:

$$c(T)=c_0+c_1\frac{T}{T_0}+c_2(\frac{T}{T_0})^2$$
$$d(T)=d_0+d_1\frac{T}{T_0}$$

(6)

在这个模型中,  $d(T)$  的温度系数(即  $d_1/T_0=1.5\text{kV/cmK}$ )和 Grant 所提出的在高场强下的温度系数类似( $1.3\text{kV/cmK}$ ).在低场强下,当  $c(T)$  远大于  $E$  时,指数  $g(F,T)$  随着  $\frac{d(T)}{c(T)}$  减小而减小.

从这个模型可以看出,保持温度恒定,增大场强可以使更多载流子电离;随着温度的升高,电离率对场强变化敏感度下降,这与 M Ershov 和 V Ryzhi 的电离率与温度场关系的结论<sup>[14]</sup>是一致的.

由于我们研究的是 TI 公司生产的 EMCCD,该模型中的相关参数需要根据器件及其工作情况进行适当的调整.

3.2 EMCCD 倍增模型

将式(5)代入式(4)可以得到 EMCCD 关于温度的电离倍增增益模型

$$M\approx r^N=\exp(N\alpha(E,T)W)\tag{7}$$

式中  $E=\frac{\lambda\Delta U}{W}$ ,  $\Delta U$  为 FP 与 CMG 两级之间的电势差;  $\lambda$  为通过氧化层及埋沟的电势衰减系数,它受到倍增区掺杂、氧化层厚度以及信号电荷包大小等因素的影响<sup>[8]</sup>.  $\lambda\Delta U$  为作用在倍增区信号电荷上的有效电势差.

从上式可以看出, EMCCD 的总增益与场强和温度密切相关,且与级联级数  $N$  呈指数关系.

以 TI 公司出品的 TC285SPD 芯片为例,确定式(6)各参数.它的倍增栅极最大电压 22V,倍增极间距的典型值  $1\mu\text{m}$ ,理论计算时取  $1.123\mu\text{m}$ ,电势衰减系数  $\lambda$  取  $0.9$ <sup>[8]</sup>,倍增级数  $N$  为 400.所以倍增区间的最大有效场强理论值  $E=\frac{(22-1.5)\times 0.9}{W}=1.66\times 105\text{V/cm}$ ,满足小于  $200\text{kV/cm}$ ,可以用式(7)模拟在不同 CMG 电压和不同温度下的倍增增益.由于 Susanna Reggiani 提供的参

数主要是对针对高温条件下半导体器件的碰撞电离过程,研究其高温(最高达 623K)特性,而对常温或者更低的温度阶段其预测效果不佳.根据 Zhihao Pan 等人对 Susanna Reggiani 参数调整的策略<sup>[15]</sup>,在我们讨论的场强范围内,计算器件栅极实测的击穿电压与 Valdinoci 模型仿真的击穿电压的差值,寻找该差值最小时所对应的一组参数.调整后的参数见表 1.

表 1 电子碰撞电离率的初始参数和调整参数 ( $a, b$ )

参数	初始值	调整值	单位
$a$	2.2	0	V
$b$	0	0.192	V

通过深入探究,本文所建立的模型同样适用于 TI 公司的另一芯片 TC253SPD 系列.其 CMG 最大电压为 15V,则片上倍增时的最大有效场强也小于  $200\text{kV/cm}$ ,倍增间距与 TC285SPD 几乎相同.将式(7)用于该芯片时,由于其 CMG 电压较低,理论上倍增区域形成的最大场强  $E=1.0819\times 105\text{V/cm}$ ,能够引起碰撞电离的可能性降低,原来的参数均不适合这种相对较低的场强,所以需要对其原有部分参数调整.调整后的参数见表 2.

表 2 电子碰撞电离率的初始参数和调整参数 ( $c, d$ )

参数	初始值	调整值	单位
$c_0$	$3.41\times 104$	$-1.3357\times 104$	V/cm
$c_1$	$-2.52\times 104$	$3.0628\times 104$	
$c_2$	$1.75\times 104$	$6.6465\times 104$	
$d_0$	$1.13\times 106$	$-0.0557\times 106$	
$d_1$	$0.45\times 106$	$1.7486\times 106$	

4 仿真计算与结果分析

使用式(7)及调整后的参数,我们借助 MATLAB 分别绘出温度  $T$  为  $-25^\circ\text{C}$ 、 $-15^\circ\text{C}$ 、 $0^\circ\text{C}$ 、 $15^\circ\text{C}$ 、 $25^\circ\text{C}$  时 TC285SPD 倍增增益与 CMG 极电压关系曲线,如图 2(a)所示.与实际 TI 公司提供的 TC285SPD 手册数据上的曲线<sup>[16]</sup>(如图 2(b))相比,二者非常接近.

以此类似,我们还绘出温度  $T$  为  $-8^\circ\text{C}$ 、 $-2^\circ\text{C}$ 、 $8^\circ\text{C}$ 、 $25^\circ\text{C}$  时 TC253SPD 倍增增益与 CMG 极电压关系曲线,如图 3(a)所示.这组曲线与 TI 公司提供的 TC253SPD 手册数据的曲线<sup>[17]</sup>(如图 3(b))比较吻合.

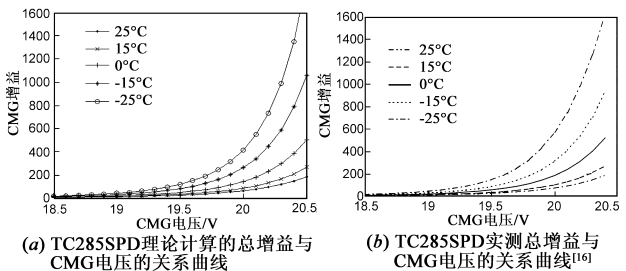


图2 TC285SPD总增益与CMG电压关系曲线

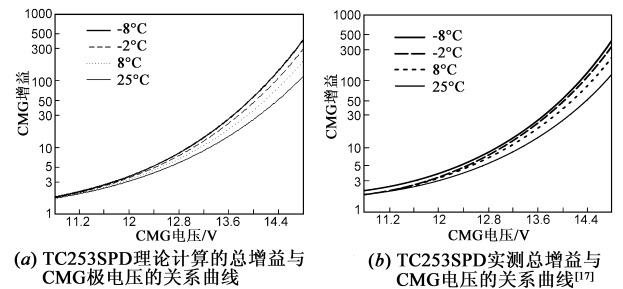


图3 TC253SPD总增益与CMG极电压的关系曲线

为了更准确地评价本文所建立的电子倍增模型的可靠性,分别在这两组曲线的每一条曲线上取 10 个计算的样本点,在 EMCCD 器件数据手册的给定曲线上也同样取 10 个实际的样本点,利用统计学回归分析理论

的曲线相关系数  $R^2$  对所建立的模型进行拟合度检验. 曲线相关系数  $R^2$  定义如下:

$$R^2 = 1 - \frac{Y_{RSS}}{Y_{TSS}} \tag{8}$$

式中  $Y_{RSS} = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$ , 是残差平方和;  $Y_{TSS} = \sum (y_i - \bar{y})^2$ , 是总平方和. 这里  $y_i$  为一系列实际值 (观测值),  $\hat{y}_i$  为一系列理论计算值.  $R^2 (0 \leq R^2 \leq 1)$  反映了在实际观测值  $y$  的总变异由有模型解释的那部分所占的比率或百分比.

对 TC285SPD 和 TC253SPD 数据手册上的电子倍增总增益与 CMG 极电压的关系曲线进行数字化,所提取的实测值以及 TC285SPD 和 TC253SPD 的理论计算值如表 3、4 所示.

表 3 TC285SPD 实测样本值和理论计算值

增益 CMG (V)	温度	TC285SPD 实测样本值					TC285SPD 理论计算值				
		$T = 25^{\circ}\text{C}$	$T = 15^{\circ}\text{C}$	$T = 0^{\circ}\text{C}$	$T = -15^{\circ}\text{C}$	$T = -25^{\circ}\text{C}$	$T = 25^{\circ}\text{C}$	$T = 15^{\circ}\text{C}$	$T = 0^{\circ}\text{C}$	$T = -15^{\circ}\text{C}$	$T = -25^{\circ}\text{C}$
18.5		2.17	4.34	8.6799	10.8499	13.0199	7.053	8.2039	10.643	14.474	18.322
18.7		4.34	6.5099	10.8499	15.1899	19.5298	8.7824	10.377	13.825	19.393	25.129
18.9		6.5099	10.8499	13.0199	17.3599	28.2098	11.155	13.406	18.381	26.659	35.425
19.1		10.8499	15.1899	19.5298	28.2098	41.2297	14.473	17.714	25.053	37.663	51.421
19.3		15.1899	19.5298	30.3797	43.3996	69.4394	19.207	23.976	35.06	54.779	76.994
19.5		19.5298	28.2098	45.5696	67.2694	112.8391	26.111	33.292	50.459	82.173	119.15
19.7		30.3797	41.2297	67.2694	108.4991	188.7884	36.417	47.501	74.817	127.37	190.94
19.9		45.5696	62.9295	108.4991	182.2785	327.6673	52.188	69.754	114.49	204.37	317.48
20.1		69.4394	97.6492	182.2785	312.4774	559.8553	76.973	105.61	181.15	340.18	548.91
20.3		112.8391	160.5787	303.7975	535.9855	954.792	117.04	165.14	296.91	588.56	988.94

表 4 TC253SPD 实测样本值和理论计算值

增益 CMG (V)	温度	TC253SPD 实测样本值				TC253SPD 理论计算值			
		$T = 25^{\circ}\text{C}$	$T = 8^{\circ}\text{C}$	$T = -2^{\circ}\text{C}$	$T = -8^{\circ}\text{C}$	$T = 25^{\circ}\text{C}$	$T = 8^{\circ}\text{C}$	$T = -2^{\circ}\text{C}$	$T = -8^{\circ}\text{C}$
11.2		1.9789	2.026	2.0743	2.3609	2.0118	2.0566	2.1089	2.1522
11.6		2.3333	2.4747	2.5337	2.9179	2.4444	2.5408	2.6417	2.7233
12.0		3	3.206	3.3605	3.736	3.1022	3.2984	3.4934	3.6499
12.4		3.8249	4.3535	4.672	5.194	4.1423	4.5389	4.9249	5.2363
12.8		5.3177	6.4194	7.1366	7.9339	5.8670	6.6848	7.4825	8.1354
13.2		8.0279	10.4001	11.8373	13.0059	8.8938	10.6510	12.4000	13.8670
13.6		13.3156	18.0817	21.8279	24.5538	14.5720	18.5770	22.7150	26.3070
14.0		23.9827	36.2054	46.3552	52.1442	26.0830	35.9280	46.6650	56.4170
14.4		49.7466	80.5941	110.7371	132.1156	51.6010	78.1350	109.2200	139.1200
14.8		124.5662	224.3556	323.1243	394.6864	114.2600	193.9900	296.2500	401.7600

通过(8)式计算在 TC285SPD 的 5 支和 TC253SPD 的 4 支不同温度曲线拟合度  $R^2$  的如表 5、6 所示.

表 5 模型对 TC285SPD 各曲线的拟合度

温度	$T = 25^{\circ}\text{C}$	$T = 15^{\circ}\text{C}$	$T = 0^{\circ}\text{C}$	$T = -15^{\circ}\text{C}$	$T = -25^{\circ}\text{C}$
$R^2$	0.9847	0.9890	0.9966	0.9840	0.9981

表 6 模型对 TC253SPD 各曲线的拟合度

温度	$T = 25^{\circ}\text{C}$	$T = 8^{\circ}\text{C}$	$T = -2^{\circ}\text{C}$	$T = -8^{\circ}\text{C}$
$R^2$	0.9897	0.9817	0.9906	0.9991

从表 5 和表 6 可以看出,该模型的拟合度  $R^2$  比较高,均在 0.98 以上,低温度下甚至达到 0.99. 这说明该模型能够在不同温度条件下对 TC285SPD 和 TC253SPD 这两种器件的级联总增益随 CMG 电压变化进行比较准确预测. 换言之,至少在这个温度范围内,该模型可以为这两种器件的增益预测与控制提供有效的依据.

## 5 结论

本文分析了 TI EMCCD 的倍增结构和原理,讨论并

确定了其电离率模型,进而得出了 EMCCD 单个倍增寄存器(1级)的电子倍增模型,确定了多级级联的倍增增益表达式.并根据不同的 EMCCD 器件(TC285SPD 和 TC253SPD)的具体情况,提供了不同的模型参数.采用数字化方法,提取了这两种 TI EMCCD 的样本数据.以此为基础,对所提出的 EMCCD 电子倍增的数学模型进行了数值验证,结果说明所提出的模型能够在不同低温条件下对这两种器件的级联总增益随 CMG 电压变化进行较为准确预测.当然该模型在更低温度下的适用性,还需要做进一步的研究.

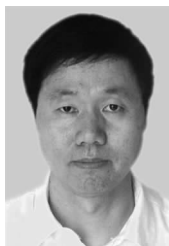
## 参考文献

- [1] Mackay C D, Tubbs R N, Bell R, Burt D, Moody I. Sub-electron read noise at MHz pixel rates[A]. Proceedings of 2001 SPIE Conference on Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications II[C]. Washington: SPIE Press, 2001. 289 – 298.
- [2] N Smith, C Coates, A Giltinan, et al. EMCCD technology and its impact on rapid low-light photometry[A]. Proceedings of 2004 SPIE Conference on Optical and Infrared Detectors for Astronomy[C]. Washington: SPIE Press, 2004. 162 – 172.
- [3] Andor Technology Ltd, Sensitivity[EB/OL]. <http://www.andor.com/learning-academy/sensitivity-making-sense-of-sensitivity>, 2011 – 12 – 15/2012 – 5 – 04.
- [4] Denvir D J and Emer Conroy. Electron multiplying CCD technology: the new ICCD[A]. Proceedings of 2002 SPIE Conference on Low-Light-Level and Real-Time Imaging Systems, Components, and Applications[C]. Washington: SPIE Press, 2002. 164 – 174.
- [5] L3VisionTM Sensors of e2v Ltd, CCD65 Series Ceramic Pack Electron Multiplying CCD Sensor [EB/OL]. <http://e2v.com/datasheets/l3-vision-datasheets.cfm>, 2004 – 06 – 15/2009 – 10 – 08.
- [6] Jaroslav Hynecsek. Impactron-A new solid state image intensifier[J]. IEEE Transaction on Electron Devices, 2001, 48(10): 2238 – 2241.
- [7] Daigle O, Gach J L, Christian G, et al. L3CCD results in pure photon counting mode[A]. Proceedings of 2004 SPIE Conference on Optical and Infrared Detectors for Astronomy[C]. Washington: SPIE Press, 2004. 219 – 227.
- [8] 张灿林, 陈钱, 尹丽菊. 基于单一型载流子的电子倍增 CCD 倍增模型[J]. 兵工学报, 2011, 32(11): 580 – 583.  
Zhang Canlin, Chen Qian, Yin Liju. Multiplication model of electron multiplying CCD based on single type of carrier[J]. Acta Armamentar, 2011, 32(11): 580 – 583. (in Chinese)
- [9] Grant W N. Electron and hole ionization rates in epitaxial silicon at high electric fields[J]. Solid State Electron, 1973, 16(10): 1189 – 1203.
- [10] Thorber K K. Applications of scaling to problems in high-field electronic transport[J]. J Appl Phys, 1981, 33(6): 279 – 290.
- [11] 何伟基, 陈钱, 等. 基于 Z 域变换的 CCM 电荷传输模型研究[J]. 电子学报, 2008, 36(6): 1140 – 1143.  
He Weiji, Chen Qian, et al. Research on model of charge delivering in CCM based on Z transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(6): 1140 – 1143. (in chinese)
- [12] Valdinoci M, Ventura D, Vecchi M C, et al. Impact-ionization in silicon at large operating temperature[A]. 1999 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices[C]. New Jersey: IEEE Press, 1999. 27 – 30.
- [13] Reggiani S, Gnani E, Rudan M, et al. Measurement and modeling of the electron impact-ionization coefficient in silicon up to very high temperatures[J]. IEEE Trans. Electron Devices, 2005, 52(10): 2290 – 2295.
- [14] Ershov M, Ryzhii V. Temperature dependence of the electron impact ionization coefficient in silicon[J]. Semiconductor Science and Technology, 1995, 10(2): 138 – 142.
- [15] Zhihao Pan, Steffen Holland. Improved impact-ionization modelling and validation with pn-junction diodes[A]. 2010 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices[C]. New Jersey: IEEE Press, 2010. 287 – 290.
- [16] Texas Instruments Ltd, TC285SPD 1004 × 1002 Pixel Impactron™ CCD Image Sensor [EB/OL]. <http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>, 2003 – 10 – 15/2005 – 10 – 15.
- [17] Texas Instruments Ltd, TC253SPD 680 × 500 Pixel Impactron™ CCD Image Sensor [EB/OL]. <http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>, 2003 – 07 – 15/2005 – 09 – 15.

## 作者简介



胡泊 男, 1987 年出生, 湖北黄冈人. 现为昆明理工大学检测技术与自动化装置专业研究生. 主要研究方向为成像技术.  
E-mail: hupo2006@126.com



李彬华(通讯作者) 男, 1963 年生于江西省新建县, 博士, 教授, 硕士生导师. 主要研究方向为电路理论、光电成像系统设计、天文探测器技术.  
E-mail: lbh@bao.ac.cn