

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102564584 A

(43) 申请公布日 2012. 07. 11

(21) 申请号 201110379701. 7

(22) 申请日 2011. 11. 25

(71) 申请人 华东师范大学

地址 200241 上海市闵行区东川路 500 号

(72) 发明人 郭方敏 王明甲 宋东东 朱自强

(74) 专利代理机构 上海蓝迪专利事务所 31215

代理人 徐筱梅 张翔

(51) Int. Cl.

G01J 1/44(2006. 01)

G06F 17/50(2006. 01)

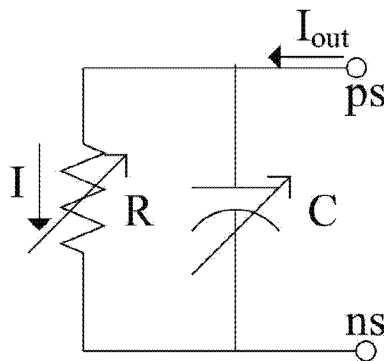
权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 5 页

(54) 发明名称

高灵敏度量子效应光电探测器等效电路的建模方法

(57) 摘要

本发明公开了一种高灵敏度量子效应光电探测器等效电路的建模方法,其特点是对量子点-量子阱光电探测器采用不同的辐照功率和器件偏压下的电特性测试,应用“VerilogA”语言建立等效电路模型,然后利用电路模拟软件进行验证,为读出电路的设计提供准确反映不同结构器件特性的光电探测器模型。本发明与现有技术相比具有建模程序简单、修改灵活、效率高,对应的不同的光功率和器件偏压参数的设置修改方便,不同光功率和器件偏压的实现可通过在等效电路模型属性中对应的预先设好的光功率和器件偏压参数中直接输入具体数据即可。



1. 一种高灵敏度量子效应光电探测器等效电路的建模方法,其特征在于对量子点-量子阱光电探测器采用不同的辐照功率和器件偏压下的电特性测试,应用“VerilogA”语言建立等效电路模型,然后利用电路模拟软件进行验证,为读出电路的设计提供准确的反映不同器件结构特性的光电探测器模型,具体方法包括下列步骤:

(1)、光电探测器的特性参数测试和拟合

a、基于光电测试平台,作出光电探测器的电流-电压特性(I-V)特性曲线簇,并用“Origin”软件采用分段拟合得到不同辐照光功率下的I与V之间的函数关系: $I_x = f_x(V, P)$,由此在等效电路中可以用一个受控电流源来实现,使输出电流为电压的函数;

b、基于光电测试平台,作出光电探测器的电容-电压(C-V)特性曲线簇,以“Origin”软件采用分段拟合得到不同辐照光功率下的C与V之间的函数关系: $C_x = g_x(V, P)$,并采用“VerilogA”语言对等效电容进行描述,由此在等效电路中可以用一个“VerilogA”语言描述电流源形式的可变电容来实现,其电容大小为电压的函数;

(2)、对等效电路中的电阻进行“VerilogA”语言描述

以电容反馈互阻放大器(CTIA)型读出结构的参考电压 V_{ref} 值为等效电路模型的输出电压,由此得到等效电路模型的输出阻抗 $R = V_{ref} / f_x(v, p)$,并采用“VerilogA”语言对等效输出电阻进行描述,由此在等效电路中可以用一个“VerilogA”语言描述的电流源形式的输出阻抗来实现;

(3)、等效电路的建模

将上述采用“VerilogA”语言描述的电流源形式的可变电容与电流源形式的输出阻抗并联,构成能与光电探测器准确匹配的等效电路模型;

(4)、等效电路模型的仿真模拟

将上述建立的等效电路模型,利用电路模拟软件“Cadence”的“Spectre”仿真器对等效电路模型进行仿真模拟,将仿真结果与实际测试的I-V和C-V特性曲线簇进行比对,以此验证等效电路模型的正确性,为读出电路的设计提供准确的光电探测器模型。

高灵敏度量子效应光电探测器等效电路的建模方法

技术领域

[0001] 本发明涉及电子、电路设计技术领域,尤其是一种高灵敏度量子效应光电探测器等效电路的建模方法。

背景技术

[0002] 光电探测器担当着将接受到的光信号转换为电信号的角色。近年来随着量子阱、量子点物理和材料技术的进展,量子效应光电探测器也应运而生。量子效应光电探测器在微光照射下,具有暗电流小、灵敏度大、动态范围大、光电转换效率高等优点,它广泛应用于医疗、生物分子科学、环境监测等领域。读出电路在光电探测系统中的主要功能是对探测器微弱信号进行预处理,并在信号处理级间提供一个接口,在对读出电路的设计中需要一个能准确反映量子效应光电探测器特性的等效电路。

[0003] 目前,已经对一些典型的光电探测器件建立了一些等效电路模型,这些模型大都是基于光电探测器内部物理方程的基础上得到的。由于光电探测器器件内部的物理特性参数过多以及在求解大量的物理特性方程时基于多种假设得到的近似表达式均会在很大程度上影响等效电路模型的精度,从而为其读出电路的设计带来困难。而且求解过程中,由于光电探测器的复杂结构及其使用的各种材料参数,也会使得建模过程中的程序编制复杂化。

[0004] 在专利号:ZL 200910047116.X 的《一种光探测器读出电路的设计方法》中提出了较简便实用的等效电路建模方法,该方法是根据器件的 I-V 和 C-V 等电特性直接拟合得出的,这种建模方法的局限性在于:不能反映出不同辐照光功率下光电探测器的 I-V 和 C-V 特性,而光电探测器 I-V, C-V 特性会随辐照光功率而变化。因此目前这种对光电探测器的等效电路的建模方法具有一定的局限性。

发明内容

[0005] 本发明的目的是针对现有技术的不足而提供的一种高灵敏度量子效应光电探测器的等效电路建模方法,采用“VerilogA”语言准确实现不同辐照功率和器件偏压下的光电探测器特性参数,以特性参数建立与光电探测器可精确匹配的等效电路,建模程序简单、效率高,大大减少了光电探测器内部的物理特性参数过多而影响模型精度以及复杂程序的编制,对应不同的光功率和器件偏压参数的设置、修改和输入非常方便,为读出电路设计提供准确的反映不同器件结构特性的光电探测器模型。

[0006] 本发明的目的是这样实现的:一种高灵敏度量子效应光电探测器等效电路的建模方法,其特点是对量子点-量子阱光电探测器采用不同的辐照功率和器件偏压下的电特性测试,应用“VerilogA”语言建立等效电路模型,然后利用电路模拟软件进行验证,为读出电路的设计提供准确反映不同结构器件特性的光电探测器模型,具体建模方法包括下列步骤:

(1)、光电探测器的特性参数测试和拟合

a、基于光电测试平台,作出光电探测器的电流—电压特性(I—V)特性曲线簇,并用“Origin”软件采用分段拟合得到不同辐照光功率下的I与V之间的函数关系: $I_n = f_n(V, P)$,由此在等效电路中可以用一个受控电流源来实现,使输出电流为电压的函数;

b、基于光电测试平台,作出光电探测器的电容—电压(C—V)特性曲线簇,以“Origin”软件采用分段拟合得到不同辐照光功率下的C与V之间的函数关系: $C_n = g_n(V, P)$,并采用“VerilogA”语言对等效电容进行描述,由此在等效电路中可以用一个“VerilogA”语言描述电流源形式的可变电容来实现,其电容大小为电压的函数;

(2)、对等效电路中的电阻进行“VerilogA”语言描述

以电容反馈互阻放大器(CTIA)型读出结构的参考电压 V_{ref} 值为等效电路模型的输出电压,由此得到等效电路模型的输出阻抗 $R = V_{ref} / I_n(v, p)$,采用“VerilogA”语言对等效输出电阻进行描述,由此在等效电路中可以用一个“VerilogA”语言描述的电流源形式的输出阻抗来实现;

(3)、等效电路的建模

将上述采用“VerilogA”语言描述的电流源形式的可变电容与电流源形式的输出阻抗并联,构成能与光电探测器准确匹配的等效电路模型。

[0007] (4)、等效电路模型的仿真模拟

将上述建立的等效电路模型,利用电路模拟软件“Cadence”的“Spectre”仿真器对等效电路模型进行仿真模拟,将仿真结果与实际测试的I—V和C—V特性曲线簇进行比对,以此验证等效电路模型的正确性,为读出电路的设计提供准确的光电探测器模型。

[0008] 本发明与现有技术相比具有以下优点:

1、电路建模程序简单、效率高,大大减少了光电探测器内部的物理特性参数过多而影响模型精度以及复杂程序的编制;

2、等效电路可以直接和读出电路进行连接,方便光电探测器设计相匹配的读出电路;

3、使用“VerilogA”语言建模,对应不同的光功率和器件偏压参数的设置修改非常方便,不同光功率和器件偏压的实现可通过在等效电路模型属性中对应的预先设好的光功率和器件偏压参数中直接输入具体数据即可,修改灵活。

附图说明

[0009] 图1为光电探测器的微光I—V特性曲线簇图;

图2为光电探测器的微光C—V特性曲线簇图;

图3为“VerilogA”单元文件页面图;

图4为电流源形式的电阻示意图;

图5为电流源形式的电阻属性页面图;

图6为等效电路中的可变电容示意图;

图7为简化的光电探测器等效电路图;

图8为等效电路模型的I—V特性仿真波形图;

图9为等效电路模型的C—V特性仿真波形图。

具体实施方式

[0010] 下面以一种灵敏度较高的量子效应光电探测器在 5nW 以下的光功率辐照下等效电路建模的实施例,对本发明作进一步说明,其具体建模步骤如下:

(1)、光电探测器的特性参数测试

基于光电测试平台,采用 Keithley 4200-SCS 半导体特性分析仪和波长为 633nm 的氦氖激光器,测试量子点-量子阱光电探测器在无光照(暗电流)和辐照光功率分别是 0.2 nW、0.5 nW、1 nW、2 nW 和 5 nW 的 I-V 和 C-V 电特性参数,并作出光电探测器电特性曲线簇。

[0011] 参阅附图 1,可以看出本微光测试系统的量子效应光电探测器低温下(120K)噪声很小(pA),具有高的灵敏度和微光特性。

[0012] 参阅附图 2,可以看出光电探测器电容在反偏下变化较小。

[0013] (2)、光电探测器特性曲线的拟合

根据测试做出光电探测器的 I-V 和 C-V 特性曲线簇,为了实现这种光电探测器高灵敏度的特点,实际器件应该工作在反偏情况下,利用“Origin”软件拟合得到不同辐照光功率下的 I-V 和 C-V 之间的函数关系: $I_n = f_n(V, P)$ 和 $C_n = g_n(V, P)$,其中:V 代表器件偏压,P 代表辐照光功率,特性曲线的拟合具体步骤如下:

a、I-V 特性曲线簇拟合

为了使拟合后的特性曲线能较好的和测试得到的 I-V 特性曲线相重合,采用“Origin”软件分段拟合得到不同辐照光功率下的 I 与 V 之间的函数关系: $I_n = f_n(V, P)$,由此可以在等效电路中可以用一个受控电流源来实现,使输出电流为电压的函数,I-V 特性曲线簇拟合时将器件偏压 -3V 至 0 之间分为两段,分别是 [-1.5, 0] 和 [-3, -1.5]。

[0014] 当器件偏压 $V \in [-3, -1.5]$ 时,光电探测器在无光照(暗电流)和辐照光功率分别是 0.2 nW、0.5 nW、1 nW、2 nW 和 5 nW 的 $I_n = f_n(V, P)$ 函数关系如下式(1)表示:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_0 = \left(0.0628 + 0.0022 \sin\left(\pi \frac{-V - 0.4174}{0.3302}\right) \right) nA / \text{暗电流} \\ I_1 = \left(\frac{0.061 - 0.347}{1 + e^{\left(\frac{-V - 1.001}{0.047}\right)}} + 0.347 \right) nA / 0.2nW \\ I_2 = \left(\frac{0.0638 - 0.6228}{1 + e^{\left(\frac{-V - 1.0014}{0.0515}\right)}} + 0.6228 \right) nA / 0.5nW \\ I_3 = \left(\frac{0.0732 - 1.6583}{1 + e^{\left(\frac{-V - 0.9736}{0.0515}\right)}} + 1.6583 \right) nA / 1nW \\ I_4 = \left(\frac{0.0741 - 2.2773}{1 + e^{\left(\frac{-V - 0.9546}{0.0528}\right)}} + 2.2773 \right) nA / 2nW \\ I_5 = \left(\frac{0.0520 - 6.6015}{1 + e^{\left(\frac{-V - 0.9326}{0.0577}\right)}} + 6.6015 \right) nA / 5nW \end{array} \right. \quad (1)$$

当器件偏压 $V \in [-1.5, 0]$ 时,光电探测器在无光照(暗电流)和辐照光功率分别是 0.2 nW、0.5 nW、1 nW、2 nW 和 5 nW 的 $I_n = f_n(V, P)$ 函数关系如下式(2)表示:

$$\left\{ \begin{aligned} I_0 &= \left(\frac{0.0573 - 187.3513}{1 + \left(\frac{-V}{3.2208} \right)^{24.2833}} + 187.3513 \right) nA / \text{暗电流} \\ I_1 &= \left(\frac{0.3973 - 152.4724}{1 + e^{\left(\frac{-V - 3.1054}{0.1285} \right)}} + 152.4724 \right) nA / / 0.2nW \\ I_2 &= \left(\frac{0.7767 - 120.0178}{1 + e^{\left(\frac{-V - 3.0460}{0.1213} \right)}} + 120.0178 \right) nA / / 0.5nW \\ I_3 &= \left(\frac{2.0775 - 244.7184}{1 + e^{\left(\frac{-V - 3.1801}{0.1387} \right)}} + 244.7184 \right) nA / / 1nW \\ I_4 &= \left(\frac{2.08048 - 802.6740}{1 + e^{\left(\frac{-V - 3.4100}{0.1538} \right)}} + 802.6740 \right) nA / / 2nW \\ I_5 &= \left(\frac{8.0687 - 378095.16631}{1 + e^{\left(\frac{-V - 4.0957}{0.1915} \right)}} + 378095.16631 \right) nA / / 5nW \end{aligned} \right. \quad (2)$$

b、C-V 特性曲线簇拟合

为了使拟合后的特性曲线能较好的和测试得到的 C-V 特性曲线相重合,采用“Origin”软件分段拟合得到不同辐照光功率下的 C 与 V 之间的函数关系: $C_n = g_n(V, P)$, 并用“VerilogA”语言对等效电容进行描述, 由此可以在等效电路中可以用一个“VerilogA”语言描述电流源形式的可变电容来实现, 其电容大小为电压的函数, C-V 特性曲线簇拟合在器件偏压 $[-3, 0]$ 范围内采用一次拟合。

[0015] 当器件偏压 $V \in [-3, 0]$ 时, 光电探测器在无光照(暗电流)和辐照光功率分别是 0.2 nW、0.5 nW、1 nW、2 nW 和 5 nW 的 $I_n = f_n(V, P)$ 函数关系如下式(3)表示:

$$\left\{ \begin{aligned} C_0 &= \left(\frac{8.0632 - 7.1628}{1 + e^{\left(\frac{V + 3.3056}{0.4601} \right)}} + 7.1628 \right) pF / \text{暗电流} \\ C_1 &= \left(\frac{7.6887 - 7.2484}{1 + e^{\left(\frac{V + 0.8837}{0.0815} \right)}} + 7.2484 \right) pF / / 0.2nW \\ C_2 &= \left(\frac{7.6839 - 7.2425}{1 + e^{\left(\frac{V + 0.5798}{0.0839} \right)}} + 7.2425 \right) pF / / 0.5nW \\ C_3 &= \left(\frac{7.6346 - 7.1978}{1 + e^{\left(\frac{V + 0.5814}{0.0820} \right)}} + 7.1978 \right) pF / / 1nW \\ C_4 &= \left(\frac{7.6324 - 7.1982}{1 + e^{\left(\frac{V + 0.5815}{0.0813} \right)}} + 7.1982 \right) pF / / 2nW \\ C_5 &= \left(\frac{7.6125 - 7.1814}{1 + e^{\left(\frac{V + 0.6011}{0.0787} \right)}} + 7.1814 \right) pF / / 5nW \end{aligned} \right. \quad (3)$$

(3)、对等效电路中的电阻进行“VerilogA”语言描述

光电探测器等效电路的电流源实现是将 I-V 之间的函数关系: $I_n = f_n(V, P)$, 光电探测

器的等效电阻如下式(4)表示：

$$R = \frac{V_o}{I_o} \quad (4)$$

由于本光电探测器的读出采用电容反馈互阻放大器(CTIA)结构,使得光电探测器等效电路模型的输出电压大小为 CTIA 型读出电路的参考电压 V_{ref} 值,而输出电流为 I_n ,由此可以得到等效电路模型的输出阻抗如下式(5)表示：

$$R = \frac{V_{ref}}{I_n} = \frac{V_{ref}}{f_n(V, P)} \quad (5)$$

以 CTIA 型读出结构的参考电压 V_{ref} 值为等效电路模型的输出电压,由此得到等效电路模型的输出阻抗 $R = V_{ref} / f_n(v, p)$, 并采用“VerilogA”语言对等效输出电阻进行描述,由此在等效电路中可以用一个“VerilogA”语言描述的电流源形式的输出阻抗来实现。

[0016] 参阅附图 3, 创建一个电流源形式的等效输出电阻“VerilogA”文件和“symbol”符号,在“Cadence”软件下新建“VerilogA”的单元文件“Cell”,并制做一个电流源形式的等效输出电阻符号。

[0017] 参阅附图 4, 将器件偏压和辐照光功率分别设为“biasvoltage”和“photopower”两个参数,并在电流源形式的等效输出电阻的属性中进行设置。因为光电探测器的电流受器件偏压和辐照光功率的影响,而等效输出电阻和输出电流有关,所以光电探测器等效电路模型中的电流源形式的电阻应该具有一个受控电流源的特点,受器件偏压和辐照光功率控制。

[0018] 参阅附图 5, 由于上述步骤中已对光电探测器在无光照(暗电流)和辐照光功率分别是 0.2 nW、0.5 nW、1 nW、2 nW 和 5 nW 的 $I_n = f_n(V, P)$ 函数关系进行了描述,所以只要在电流源的属性中将器件偏压和光功率对应的参数“biasvoltage”和“photopower”直接输入数据即可,参数设置和修改都非常方便。

[0019] 如当器件偏压为 -2V 和光功率为 1nW 时,只要在“biasvoltage”选项中输入“-2”,在“photopower”选项中输入“1”即可,采用“VerilogA”语言描述的电流源式的等效电阻表达如下式(6)表示：

$$I(out) < +V(out) / R \quad (6)$$

由于 CTIA 型读出电路的参考电压 $V_{ref} = 2.5V$, 所以电流源式的等效电阻 $R = V_{ref} / I_n = 2.5 / f_n(v, p)$, 在电流源形式的等效输出电阻的“VerilogA”语言描述时定义电流源的两个端口为“ns”和“ps”,并设定器件的偏压和光功率两个参数“biasvoltage”和“photopower”的初值,实际使用时可在器件属性中进行修改,因为 I-V 特性是分段拟合的,不同的光功率对应不同的 I-V 曲线,所以在用“VerilogA”语言描述时分别使用了“if-else”和“case”语句来实现。

(4)、对等效电路中的可变电容进行“VerilogA”语言描述

参阅附图 6, 创建一个可变电容的“VerilogA”文件和“Symbol”符号,建立一个可变电容的单元“cell”和“Symbol”符号,因为光电探测器的电容受器件偏压和辐照光功率的影

响,所以光电探测器等效电路模型中的电容应该是一个受器件偏压和辐照光功率控制的可变电容。将器件偏压和辐照光功率分别设为“biasvoltage”和“photopower”两个参数,设置和修改方法同电流源形式的等效输出电阻相同,采用“VerilogA”语言描述的电流源式的可变电容表达如下式(7)表示:

$$I(out) <+ ddt(C*V(out)) \quad (7)$$

即 $i(t) = \frac{d(c \cdot u(t))}{dt}$, 这里的电容 C 本身也是随器件偏压和光功率变化的,所以电容 C

必须放在括号里面, 电容 C 和器件偏压和光功率的关系为: $C_n = g_n(V, P)$ 。在电流源形式的可变电容“VerilogA”语言描述时,定义了电流源的两个端口为“ns”和“ps”,并设定器件的偏压和光功率两个参数“biasvoltage”和“photopower”的初值,实际使用时可在器件属性中进行修改,因为在器件偏压 $V \in [-3, 0]$ 范围内的 C-V 特性曲线是一次拟合的,不同的光功率对应不同的 C-V 特性曲线,所以在用“VerilogA”语言描述时使用了“case”语句来实现。

(5)、等效电路的建模

参阅附图 7,采用“VerilogA”语言将受控电流源和等效输出电阻用一个程序来描述,并生成一个“Symbol”符号,使得到的等效电路模型只包含两部分,一部分是电流源形式的电阻,另一部分是个可变电容,即光电探测器可等效为一个电流源形式的电阻与可变电容并联的电路模型。

[0020] (5)、对等效电路模型进行仿真模拟验证

参阅附图 8,将上述建好的光电探测器的等效电路模型,利用电路模拟软件“Cadence”的“Spectre”仿真器分别对等效电路模型在器件偏压 $[-3, 0]$ 内进行直流分析和器件偏压“biasvoltage”和光功率“photopower”两个参数进行参数扫描,对上述建立的等效电路模型进行仿真模拟,将仿真得到的等效电路模型 I-V 特性结果与实际测试的 I-V 特性曲线簇进行对比验证。

[0021] 参阅附图 9,将上述建好的光电探测器的等效电路模型,在器件偏压 $[-3, 0]$ 内对等效电路模型做交流分析并做器件偏压“biasvoltage”和光功率“photopower”两个参数进行参数扫描,将仿真得到的等效电路模型 C-V 特性结果与实际测试的 C-V 特性曲线簇进行对比验证。

[0022] 通过上述等效电路模型的 I-V 和 C-V 仿真曲线与实际测试的 I-V 和 C-V 曲线簇的比对,可以看出两者能很好地吻合,验证仿真曲线与实际测试的 I-V 和 C-V 曲线簇相重合,由此能够验证等效电路模型的正确性,可以为读出电路的设计提供准确反映不同结构器件特性的光电探测器模型。

[0023] 以上实施例只是对本发明做进一步说明,并非用以限制本发明专利,凡为本发明等效实施,均应包含于本发明专利的权利要求范围之内。

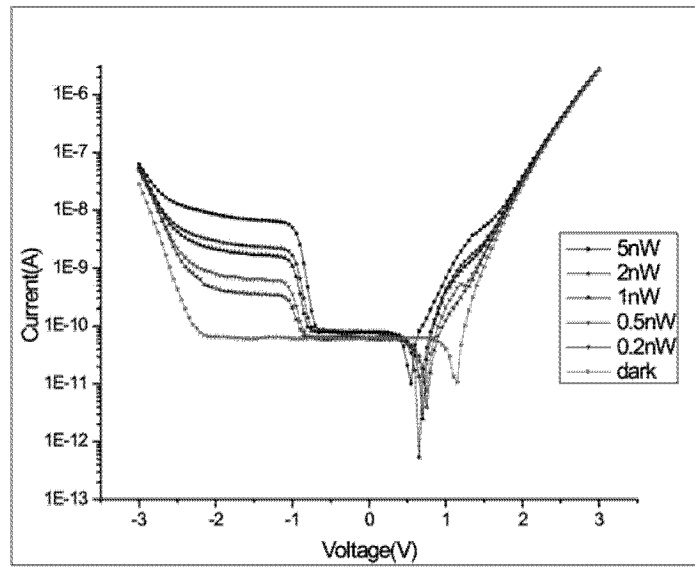


图 1

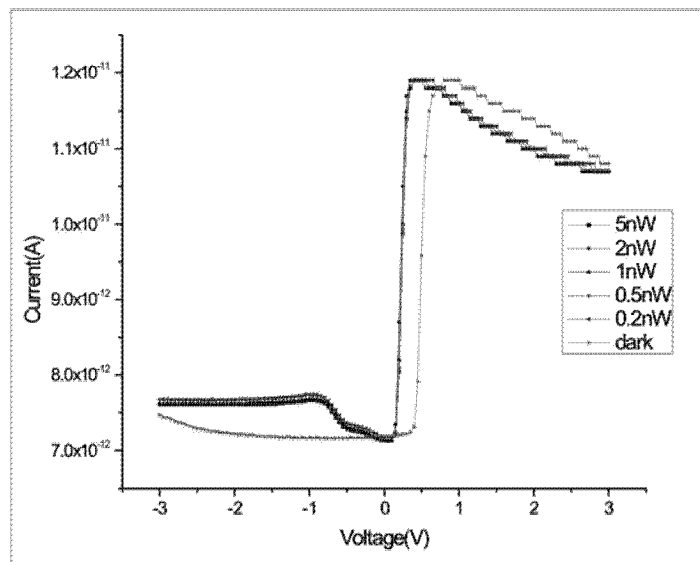


图 2



图 3

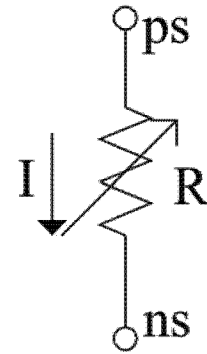


图 4

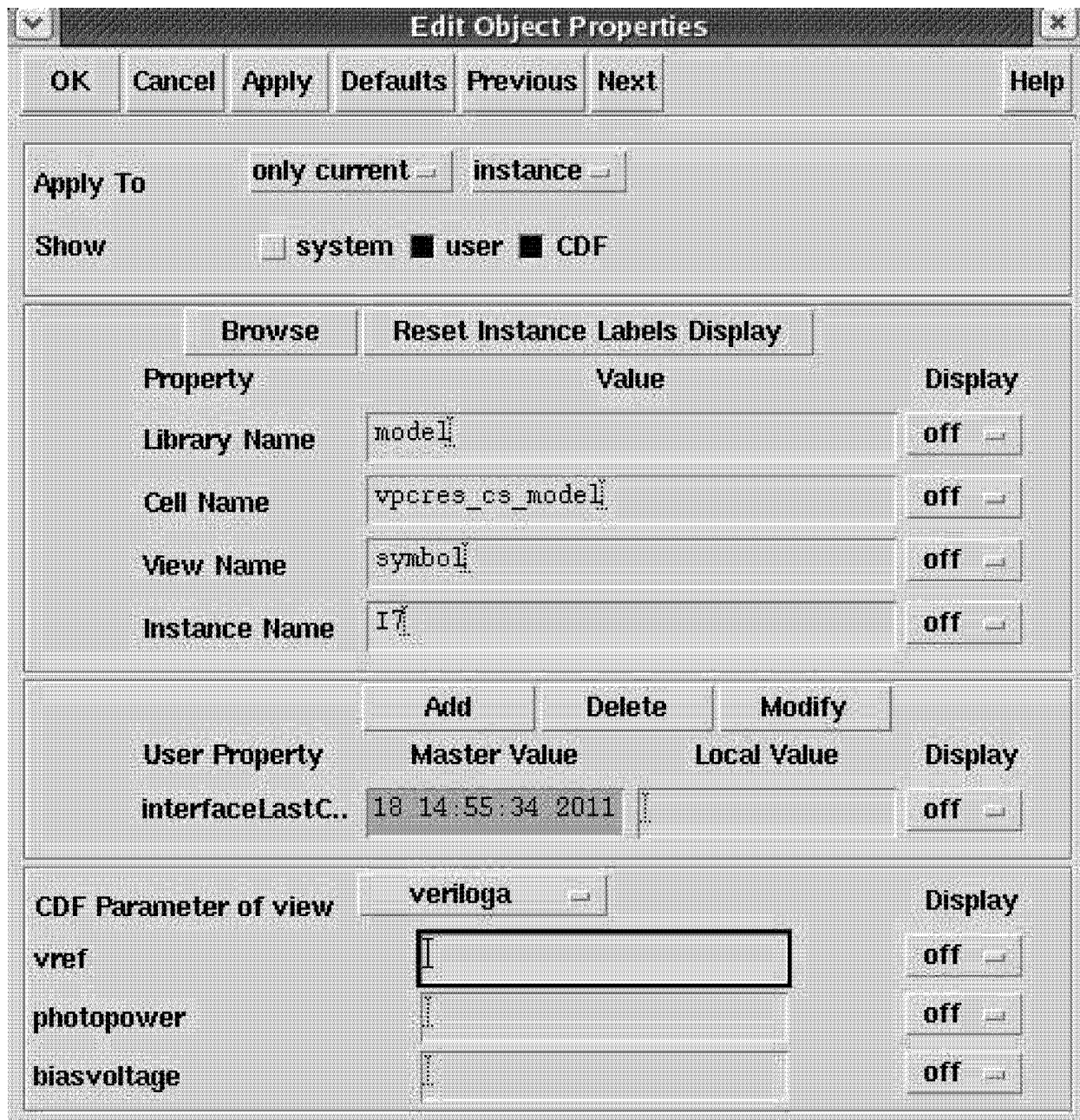


图 5

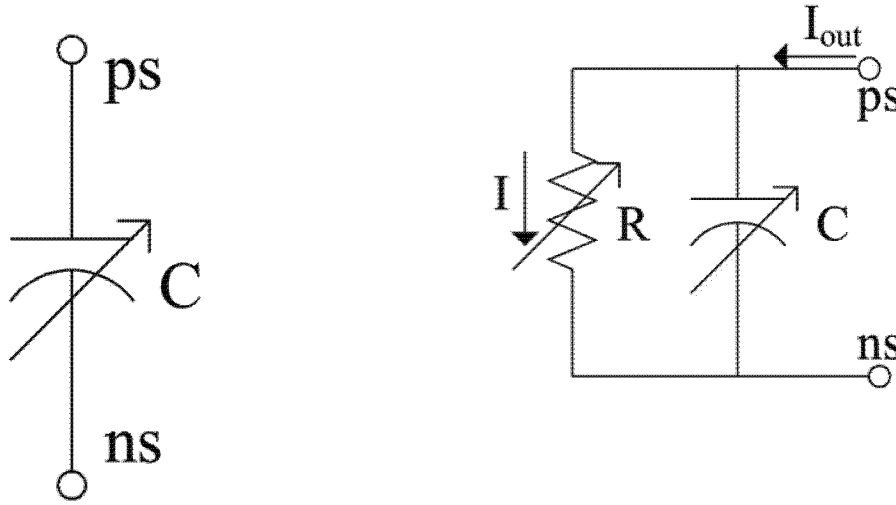


图 6

图 7

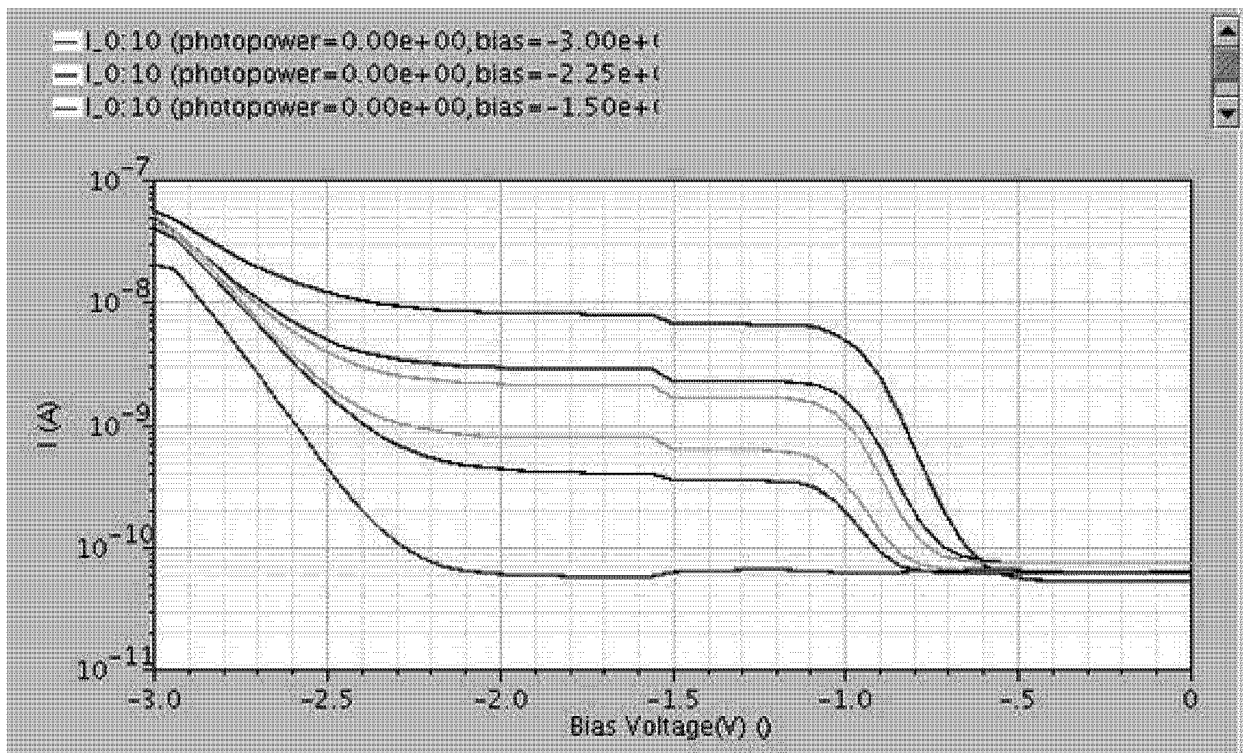


图 8

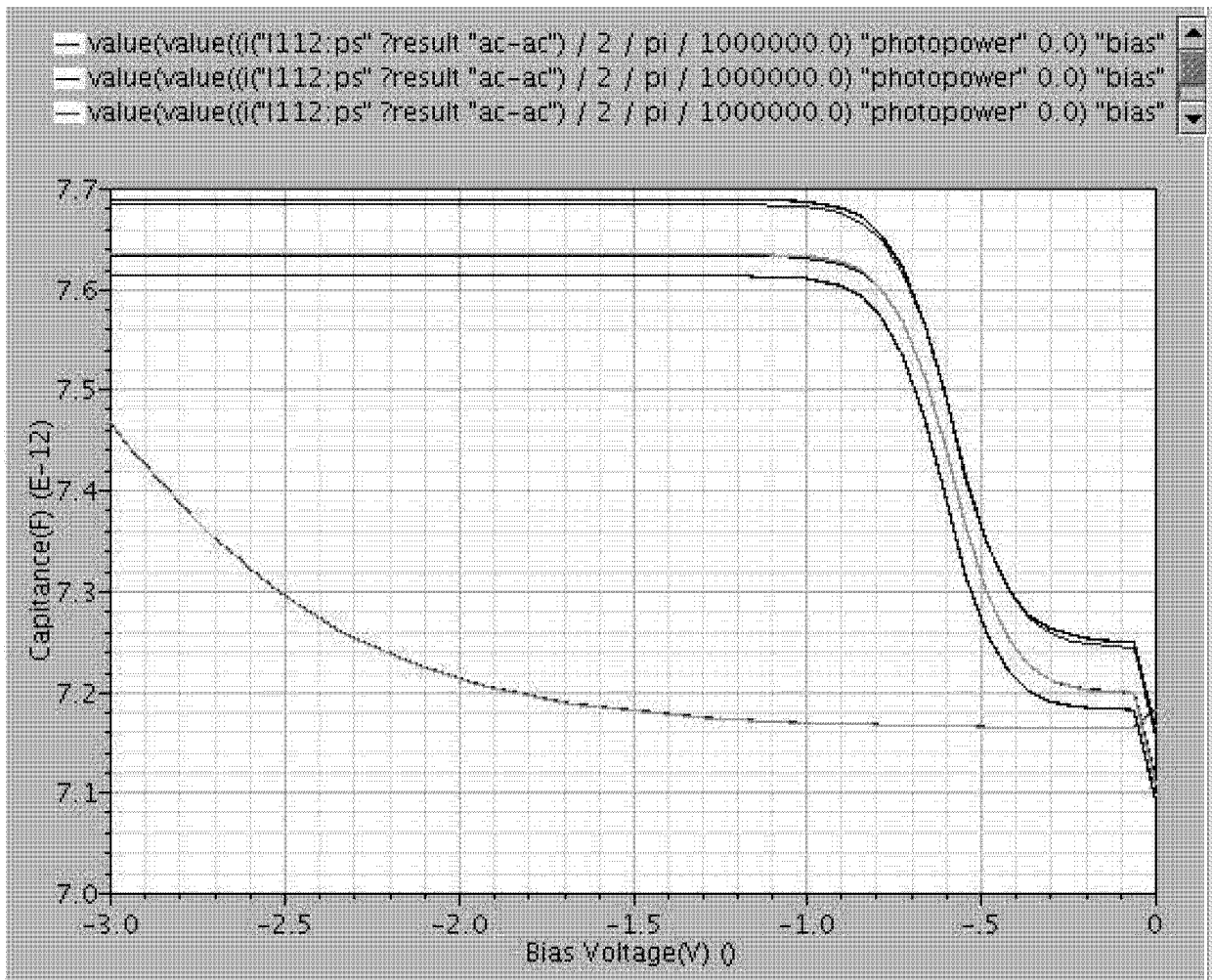


图 9