

doi:10.3788/gzxb20174611.1125004

单载流子传输光敏晶体管小信号等效电路模型的建立与分析

孙丹, 谢红云, 刘芮, 刘硕, 吴佳辉, 张万荣

(北京工业大学 信息学部 电子科学与技术学院, 北京 100124)

摘 要:建立了单载流子传输双异质结光敏晶体管的小信号等效电路模型.分析了单载流子传输双异质结光敏晶体管光生电流的产生机制,并将其作为基极电流的一部分,引入到小信号等效电路中.分析了单载流子传输双异质结光敏晶体管中单载流子传输的输运方式对光跨导、发射结电阻、发射结电容和集电结电容的影响.基于所建模型,研究了 InP 基单载流子传输双异质结光敏晶体管的光特征频率和光电流增益受光窗口面积和入射光功率的影响.结果表明,在同样入射光功率下,存在一个最佳的光窗口面积使得光特征频率获得最大值,最佳光窗口面积随入射光功率的增加在一定面积范围内发生偏移.在固定光窗口面积($8 \times 8 \mu\text{m}^2$)条件下,随着输入光功率的增加,光特征频率先增大后减小,在 $280 \mu\text{W}$ 时达到最高值 150 GHz,光短路电流增益也随着光功率的增加而逐渐增加,在入射光功率 $750 \mu\text{W}$ 时达到饱和,饱和增益为 82 dB.

关键词:小信号等效电路模型;单载流子传输;光敏晶体管;光特征频率;光短路电流增益

中图分类号:TN2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)11-1125004-7

Modeling and Analysis of a Uni-traveling Carrier Phototransistor Based on its Small Signal Equivalent Circuit

SUN Dan, XIE Hong-yun, LIU Rui, LIU Shuo, WU Jia-hui, ZHANG Wan-rong

(College of Electronic Science and Technology, Faculty of Information Technology,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The small signal equivalent model of a Uni-Traveling Carrier Double Hetero-junction Phototransistor (UTC-DHPT) was established. In this model, the optical generated current in UTC-DHPT was introduced reasonably as part of base current. The influence of single carrier transportation in UTC-DHPT on photo transconductance, emitter junction effective resistor, emitter junction capacitor, and collector junction capacitor were analyzed. Based on the established small signal equivalent model, the dependence of optical characteristic frequency and the optical generated current gain on optical window area and illumination light power of an InP-based UTC-DHPT were analyzed. At certain illumination light power, there is an optimum window area which can achieve the maximum optical characteristic frequency. Meanwhile, the optimum window area would change in certain range as illumination light power increasing. When chosen the optical injection window of $8 \times 8 \mu\text{m}^2$, With the gradual increase of illumination light power, the characteristic frequency increases at first and then decreases, the highest value reaches 150 GHz at $280 \mu\text{W}$. The gain of optical generated current increases gradually too and

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61604106, 61574010, 61006044, 61774012),北京市未来芯片技术高精尖创新中心科研基金(No. KYJJ2016008),北京市自然科学基金(Nos.4122014, 4142007)和山东省自然科学基金(No.ZR2014FL025)资助

第一作者:孙丹(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为半导体光电子学,Email:S201502020@bjut.edu.cn

导师(通讯作者):谢红云(1978—),女,副教授,博士,主要研究方向为半导体光电子学,Email:xiehongyun@bjut.edu.cn

收稿日期:2017-05-27; **录用日期:**2017-07-04

<http://www.photon.ac.cn>

reaches the saturation gain of 82 dB under 750 μW .

Key words: Small signal equivalent model; Uni-travelling carrier; Phototransistor; Optical characteristic frequency; Gain of optical generated

OCIS Codes: 250.0250; 040.0040; 230.0230; 350.0350

0 引言

随着微波光电子学的发展,微波光纤通信系统接收机的结构也发生了变化,以光探测器为核心元件的单片光子集成功能模块逐渐取代光学探测器和电学放大器组成的光电功能模块^[1-4].单片光子集成接收机一方面需要探测器完成光载微波信号高速和高效率的探测,另一方面需要完成光载微波信号的放大和混频.异质结光敏晶体管探测器可以使用晶体管的线性和非线性特性同时实现光信号探测、放大和光信号的混频,因此,在微波光通信系统中的应用越来越广泛^[5-6].尤其是单载流子传输双异质结光敏晶体管(Uni-Travelling Carrier Double Hetero-junction Phototransistor, UTC-DHPT)可以同时提供高的光短路电流增益和高的光特征频率^[7-9],使用 UTC-DHPT 器件建立微波光放大器逐渐成为近几年研究的热点.

由于光敏晶体管(Hetero-junction Phototransistor, HPT)是一个非线性器件,基于 HPT 的微波光学放大器电路的设计分析是非常困难的.小信号等效电路模型可以对非线性器件进行线性化,从而简化放大器电路的设计和分析,目前已有一些研究工作关注 HPT 等效电路模型的建立.Khan Hassan A 等建立了 InGaP/GaAs HPT 等效电路模型^[10],Guo-En Chang 等建立了 GeSn HPT 的等效电路模型^[11].但是他们所建的模型均是单异质结光敏晶体管的等效电路模型,对于载流子输运方式不同的 UTC-DHPT,已存在的等效电路模型并不适用.因此,本文基于异质结晶体管的等效电路模型,建立了 UTC-DHPT 的小信号等效电路,分析单载流子传输产生的光生电流,并以合理的方式加入到模型之中,同时考虑光生载流子对于结电压,跨导,结电容等的影响.运用该模型,分析了 UTC-DHPT 的光特征频率和光电流增益受器件光窗口面积和入射光功率的影响.

1 器件结构

InP 基 UTC-DHPT 的器件结构如图 1. $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ n-欧姆接触层的掺杂浓度为 10^{19} cm^{-3} ,厚度为 100 nm. InP n-盖层的掺杂浓度为 10^{19} cm^{-3} ,厚度为 1 800 nm. n-InP 发射区掺杂浓度为 10^{17} cm^{-3} ,厚度为 50 nm. 基区采用掺杂浓度为 10^{18} cm^{-3} 的 p 型 InGaAsP,厚度为 100 nm,带隙为 0.80 eV. 集电区采用掺杂浓度为 10^{16} cm^{-3} 的 n 型 InGaAsP,厚度为 400 nm,带隙为 1.12 eV. 为了进一步降低 b-c 结导带尖峰,在基区与集电区之间分别加入带隙为 0.80 eV、0.88 eV 的 InGaAsP 作为过渡层.

UTC-DHPT 发射极条宽 2 μm ,条长 8 μm ,位于基区的光窗口面积为 $8 \times 8 \mu\text{m}^2$,当 UTC-DHPT 作为光敏探测器时,波长为 1.55 μm 的入射光从基极台面窗口垂直入射,这样可以减少发射极接触层的额外光吸收功率损耗.

对于光敏晶体管,光生电流 I_{opt} 与入射光功率 P_{opt} 的关系为^[12]

$$I_{\text{opt}} = \frac{\eta qDA_{\text{window}}}{h\nu} = \frac{\eta qp_{\text{opt}}}{h\nu} \quad (1)$$

式中, h 是普朗克常数, ν 是入射光信号的频率, η 是转换效率值, D 是入射光功率密度, A_{window} 是入射光窗口面积, D 与 A_{window} 的乘积即是入射光功率.

UTC-DHPT 采用 e-b 结和 b-c 结的双异质结结构,只用重掺杂基区作为吸收层.当光垂直入射时,光生载

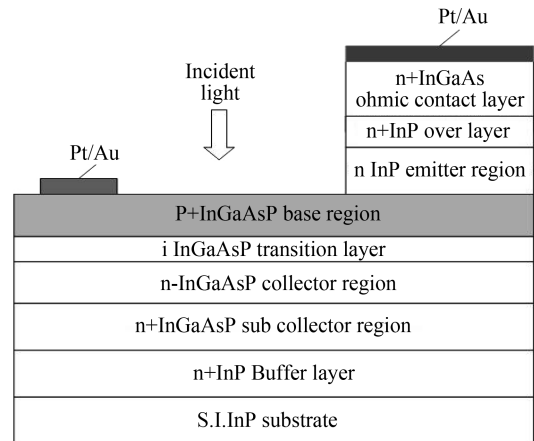


图 1 UTC-DHPT 器件二维结构

Fig.1 Two-dimensional device structure of UTC-DHPT

流子在基区产生,光生电子漂移至 b-c 结界面,被完全耗尽的集电区的反向电场扫到集电极,形成了最初的光生电子电流 I_{opt} ,光生空穴作为多数载流子经过快速弛豫后到达 e-b 结界面,增加 e-b 结耗尽区的正电荷,降低 e-b 结势垒,发射区大量的电子翻越 e-b 结势垒扩散到达基区,然后被收集至集电极,从而放大了最初的光生电子电流.集电极输出电流 $I_{c,opt}$ 由光生电流 I_{opt} 与基极电偏置电流 I_B 共同构成的基极偏置电流放大产生,因此 $I_{c,opt}$ 与入射光功率 P_{opt} 的关系式表达^[12]为

$$I_{c,opt} = \beta(I_{opt} + I_B) = \frac{\beta\eta qP_{opt}}{h\nu} + \beta I_B \quad (2)$$

图 2 为 UTC-DHPT 器件的集电极输出电流随入射光强的变化曲线,其中三角形数据点为图 1 中 UTC-DHPT 采用半导体器件仿真工具 Silvaco TCAD 在 V_{cc} 为 2V,基极开路时的仿真测试数据,实线是根据式(2)拟合的曲线.由于基极开路,电偏置电流 I_B 为 0, $I_{c,opt}$ 的大小主要由 P_{opt} 决定.由图 2 可知,随着入射光强的增大,集电极输出电流 $I_{c,opt}$ 逐渐增加,最大值约为 75 mA.为保证式(2)拟合曲线与仿真测试数据一致,转换效率的拟合值随着光功率的增加逐渐变小,按三个区域划分,分别为 0.98,0.73,0.52.

UTC-DHPT 的光响应度 $\gamma_{UTC-DHPT}$ (A/W) 表示为^[12]

$$\gamma_{UTC-DHPT} = \frac{I_{c,opt}}{P_{opt}} \quad (4)$$

图 2 中 3 个区域的光响应度分别为 41 A/W,30 A/W,21 A/W.可以看出光转换效率和光响应度均随着光功率的增加逐渐变小,其原因在于,随着光功率的增加,光生载流子在基区的浓度越来越高,虽然 UTC 结构能够提高光生空穴的输运速率,但依然会因为空穴迁移率低而在集电结界面处有所积累,产生的势垒电压会影响集电结反向电压对电子的抽取,影响集电结光生电流,从而导致光响应度逐渐变小.

2 小信号等效电路模型

HBT 的小信号等效模型指的是小信号电流电压方程及小信号等效电路.本文基于 HBT 等效电路模型建立光照下 UTC-DHPT 的混合 π 等效电路,如图 3.

图 3 中, I_{opt} 是式(1)给出的光生电子电流, $g_{m,opt}$ 是 UTC-DHPT 的跨导. R_{cc} 和 L_c 分别为发射极电阻和发射极电感; $C_{DE,opt}$ 是发射结的扩散电容; $C_{be,opt}$ 是发射结的势垒电容; $R_{be,opt}$ 是发射结的结电阻. R_{bbi} 和 R_{bbx} 是基极电阻; L_b 是基极电感. C_{bc} 和 R_{bc} 分别为集电结的势垒电容和集电结的结电阻; $C_{sc,opt}$ 是集电极耗尽区的空间电荷电容; R_{cc} 和 L_c 分别是集电极电阻和集电极电感.

UTC-DHPT 采用 e-b 结和 b-c 结的双异质结结构,使得重掺基区作为主要吸收层.当光垂直入射时,光生载流子只产生于基区,所以不同于已有文献中所讨论的 HPT 小信号等效电路模型,光生电子电流 I_{opt} 只放在了基区,如图 3 所示.

根据电中性条件,与光生电子对应的是大量的光生空穴.作为基极中的多数载流子,光生空穴经过快速弛豫后输运到发射结界面,并在此积累,因此在发射结界面形成了光生结电压 $V_{BE,opt}$ ^[13],其表达式为式(5),随着入射光功率增大而增加.

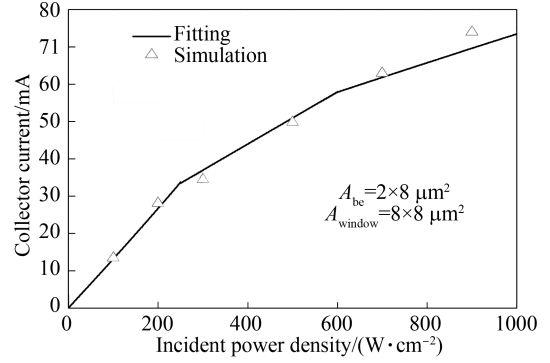


图 2 UTC-DHPT 集电极电流随入射光功率密度的变化曲线
Fig.2 Variations of collector output current of UTC-DHPT as a function of incident power density

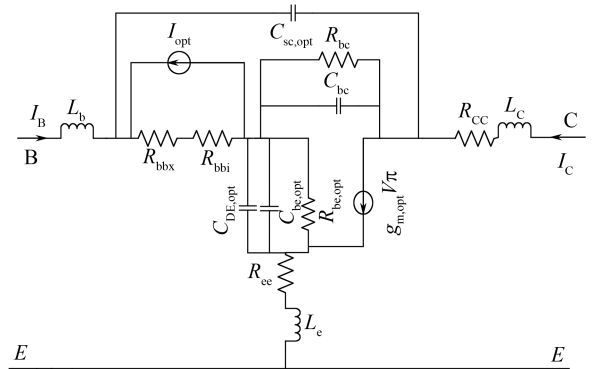


图 3 UTC-DHPT 的等效电路模型
Fig.3 Equivalent circuit model of UTC-DHPT

$$V_{BE,opt} = \frac{2q}{\epsilon} \left(\eta \frac{P_{opt} \tau_p}{A_{j, BE} h \nu} \right)^2 \left(\frac{N_{ED} + N_{BA}}{N_{ED} N_{BA}} \right) \quad (5)$$

式中 N_{ED} 和 N_{BA} 分别为发射区和基区的掺杂浓度, τ_p 是光生空穴寿命, ϵ 是基区的介电常数.

UTC-DHPT 在光照情况下的跨导定义^[13]为

$$g_{m,opt} \equiv \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{q I_{c,opt}}{KT} \quad (6)$$

式中 $I_{c,opt}$ 是集电极输出电流, 结合式(2)可以得出, $g_{m,opt}$ 随着 $I_{c,opt}$ 增大而增加, 与入射功率呈正比关系.

图 3 小信号等效电路中发射结电阻 $R_{be,opt}$ 与入射光功率的关系如式(7)所示^[14-16]

$$R_{be,opt} = \frac{KT h \nu}{q^2 \eta P_{opt} \beta} \quad (7)$$

式中 k 是玻尔兹曼常数, T 是绝对温度, 发射结电阻 $R_{be,opt}$ 与入射光功率呈反比.

对于基区均匀掺杂的 UTC-DHPT, 发射结的扩散电容 $C_{DE,opt}$ 表达式为^[14-16]

$$C_{DE,opt} = A_{j, BE} \frac{q^2}{KT} (p_{n0} L_p + n_{p0} L_n) e^{q(V_{BE,opt} + V_{A, BE})/KT} \quad (8)$$

式中, p_{n0} 是发射区平衡少数载流子浓度, n_{p0} 是基区平衡少数载流子浓度, L_p 和 L_n 分别为空穴的扩散长度和电子的扩散长度. 由式(6)可知, 发射结的扩散电容 $C_{DE,opt}$ 由发射结电压决定, 而后者由光生结电压 $V_{BE,opt}$ 和正向偏压 $V_{A, BE}$ 组成, $V_{BE,opt}$ 随着光功率 P_{opt} 的增大而增大, 所以 UTC-DHPT 器件的扩散电容 $C_{DE,opt}$ 和 HBT 器件的扩散电容不同, 受光照影响, 随着光功率的增大而增大.

UTC-DHPT 器件的发射结势垒电容 $C_{be,opt}$ 为^[14-16]

$$C_{be,opt} = A_{j, BE} \left[\frac{q\epsilon}{2(V_{BJ, BE} - V_{BE,opt} - V_{A, BE})} \frac{N_{ED} N_{BA}}{N_{ED} + N_{BA}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中, $V_{BJ, BE}$ 是发射结内建电压; $V_{A, BE}$ 是外加电压, 很明显可以看出发射结势垒电容 $C_{be,opt}$ 受内建电压 $V_{BJ, BE}$, 光生结电压 $V_{BE,opt}$ 以及外加电压 $V_{A, BE}$ 的影响, 当光功率增大, 光生电压随之增大, 发射结势垒电容也会增加.

UTC-DHPT 器件的集电结势垒电容 C_{bc} 为^[14-16]

$$C_{bc} = A_{j, BC} \left[\frac{q\epsilon}{2(V_{BJ, BC} - V_{A, CE})} \frac{N_{CD} N_{BA}}{N_{CD} + N_{BA}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中 N_{CD} 是集电极的掺杂浓度, $V_{BJ, BC}$ 是集电结的内建电压. 与发射结势垒电容不同的是集电结势垒电容的大小取决于内建电压 $V_{BJ, BC}$ 和外加电压 $V_{A, BC}$, 与光生电压没有关系, 所以随着入射光功率的增大, 集电结势垒电容 C_{bc} 保持不变. 由于集电结反偏, 集电结电阻值很大, 受光生载流子的影响可以忽略, 因此也保持不变.

电子注入到集电层耗尽区引起的空间电荷电容 $C_{sc,opt}$ 为^[14-16]

$$C_{sc,opt} = \frac{W_{DC}}{2\nu_s} g_{m,opt} \quad (11)$$

式中, W_{DC} 是基极/集电极结耗尽层宽度; ν_s 是电子饱和速度. $C_{sc,opt}$ 大小取决于耗尽层的宽度, 电子饱和速度和光生跨导 $g_{m,opt}$, 所以当 UTC-DHPT 器件处于光照条件下时, 由于光生跨导 $g_{m,opt}$ 随着入射光功率的变化而变化, 空间电荷电容 $C_{sc,opt}$ 也随着光功率的增加而变大.

3 结果和讨论

光特征频率 $f_{T,opt}$ 表示入射光转变为光电流的快慢, 反映 UTC-DHPT 的响应速度, 提高光特征频率可以增加 UTC-DHPT 的工作带宽, 使 UTC-DHPT 在微波光通信系统中的应用更加广泛. UTC-DHPT 作为以基区入射光电流作为偏置的光敏晶体管, 其光特征频率为光短路电流增益 $h_{fe,opt}$ 降为 1 时 UTC-DHPT 的工作频率. 基于本文建立的小信号模型, 光生特征频率 $f_{T,opt}$ 表达式为^[16]

$$f_{T,opt} = \frac{g_{m,opt}}{2\pi C} = \frac{g_{m,opt}}{2\pi(C_{DE,opt} + C_{be,opt} + C_{bc} + C_{sc,opt})} \quad (12)$$

UTC-DHPT 的光短路电流增益 $h_{fe,opt}$ 为^[16]

$$h_{fe,opt} \equiv \frac{I_c}{I_b} = \frac{g_{m,opt} - sC_{bc}}{\frac{1}{R_{be,opt}} + s(C_{DE,opt} + C_{be,opt} + C_{bc})} \quad (13)$$

由式(10),式(11)得知,光特征频率 $f_{T,opt}$ 和光短路电流增益 $h_{fe,opt}$ 的大小由跨导 $g_{m,opt}$,发射结扩散电容 $C_{DE,opt}$,发射结势垒电容 $C_{be,opt}$ 以及空间电荷电容 $C_{sc,opt}$ 决定。 $g_{m,opt}$, $C_{DE,opt}$, $C_{be,opt}$ 和 $C_{sc,opt}$ 均受光生载流子的影响,因此入射光窗口面积和入射光功率 P_{opt} 成为影响 UTC-DHPT 的 $f_{T,opt}$ 和 $h_{fe,opt}$ 的主要因素,本文对其进行模拟仿真并进行讨论,模拟仿真的具体材料参数如表 1 所示。

表 1 仿真所用的具体材料参数

Table 1 Material parameters used for simulation

Parameter	Value (respectively)	Reference
p_{n0}	10^3 cm^{-3}	[7]
n_{p0}	10^2 cm^{-3}	[7]
L_p	$4 \times 10^{-5} \text{ cm}$	[1][3][7]
L_n	$1 \times 10^{-4} \text{ cm}$	[1][3][7]
V_s	$2.5 \times 10^7 / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	[1][3][7][8]
τ_p	$1.8 \times 10^{-10} \text{ s}$	[1][3]
ϵ	12.14	[1][3][7][8]
V_{CE}	2 V	[1][3][7][8]

首先对不同入射光功率下,入射光窗口面积对光生特征频率的影响进行讨论.如图 4 所示,随着光窗口面积的增大,光特征频率先是急速上升然后缓慢下降,存在一个最佳光窗口面积,使光特征频率获得极大值.而且,入射光功率比较小时,光特征频率的极大值对应的光窗口面积较小;随着入射光功率的增大,光特征频率的极大值对应的光窗口面积有所增加.在 $50 \sim 100 \mu\text{m}^2$ 的光窗口面积范围内,不同入射光功率下均获得了较满意的光特征频率.同时不同光窗口面积对应的器件光特征频率最大值基本一致.因为 UTC-DHPT 是一个基区入射光电流作为偏置的光敏异质结晶体管,通常晶体管的特征频率由材料参数和结构几何参数决定,仅改变其入射光窗口的面积,不改变 UTC-DHPT 的材料参数和结构几何参数如基区宽度和发射极的条宽条长等,UTC-DHPT 光特征频率最大值基本一致.另一方面,从文中分析等效电路中发射结和集电结元件的分析表达式可以看出,入射光窗口的面积只对集电结势垒电容 C_{bc} 有影响, C_{bc} 与其他等效电容相比数值较小,所以在窗口面积改变时,UTC-DHPT 的光特征频率的极大值基本一致。

本文选取固定光窗口面积为 $8 \times 8 \mu\text{m}^2$ (发射结面积为 $2 \times 8 \mu\text{m}^2$),讨论入射光功率对 UTC-DHPT 性能的影响.此时,UTC-DHPT 小信号等效模型中的元件如 $g_{m,opt}$, $R_{be,opt}$, $C_{DE,opt}$, $C_{be,opt}$ 和 $C_{sc,opt}$ 与入射光功率的关系如图 5,随着入射光功率的逐渐增大, $g_{m,opt}$, $C_{DE,opt}$, $C_{be,opt}$ 和 $C_{sc,opt}$ 均不断增大, $R_{be,opt}$ 则随着入射光功率的增大而减小。

结合图 5 所示等效电路中元件随入射光功率的变化与式(10)给出的光生特征频率 $f_{T,opt}$ 的表达式,在固定的光窗口面积下,UTC-DHPT 的光生特征频率 $f_{T,opt}$ 随入射光功率 P_{opt} 的变化如图 6.随着入射光功率在一定范围内的逐渐增加,光生特征频率 $f_{T,opt}$ 先增大后减小,当入射光功率为 $280 \mu\text{W}$ 时,光学特征频率达到最大值约为 150 GHz.

同样,结合图 5 等效电路中元件随入射光功率的变化与式(11)给出的短路电流增益 $h_{fe,opt}$ 的表达式,在固定的光窗口面积下,UTC-DHPT 在不同入射光功率下,短路电流增益 $h_{fe,opt}$ 和频率的关系曲线如图 7 所示.随着入射光功率的逐渐增大,短路电流增益 $h_{fe,opt}$ 也不断增大,并逐渐趋于饱和,当入射光功率为 $750 \mu\text{W}$ 时,短路电流增益 $h_{fe,opt}$ 达到饱和为 82 dB.

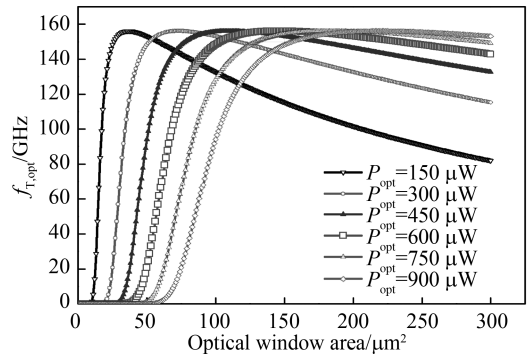


图 4 不同光窗口面积下光生特征频率 $f_{T,opt}$ 随入射光功率的变化

Fig. 4 Variation of optical characteristic frequency $f_{T,opt}$ with the incident optical power under different optical window area

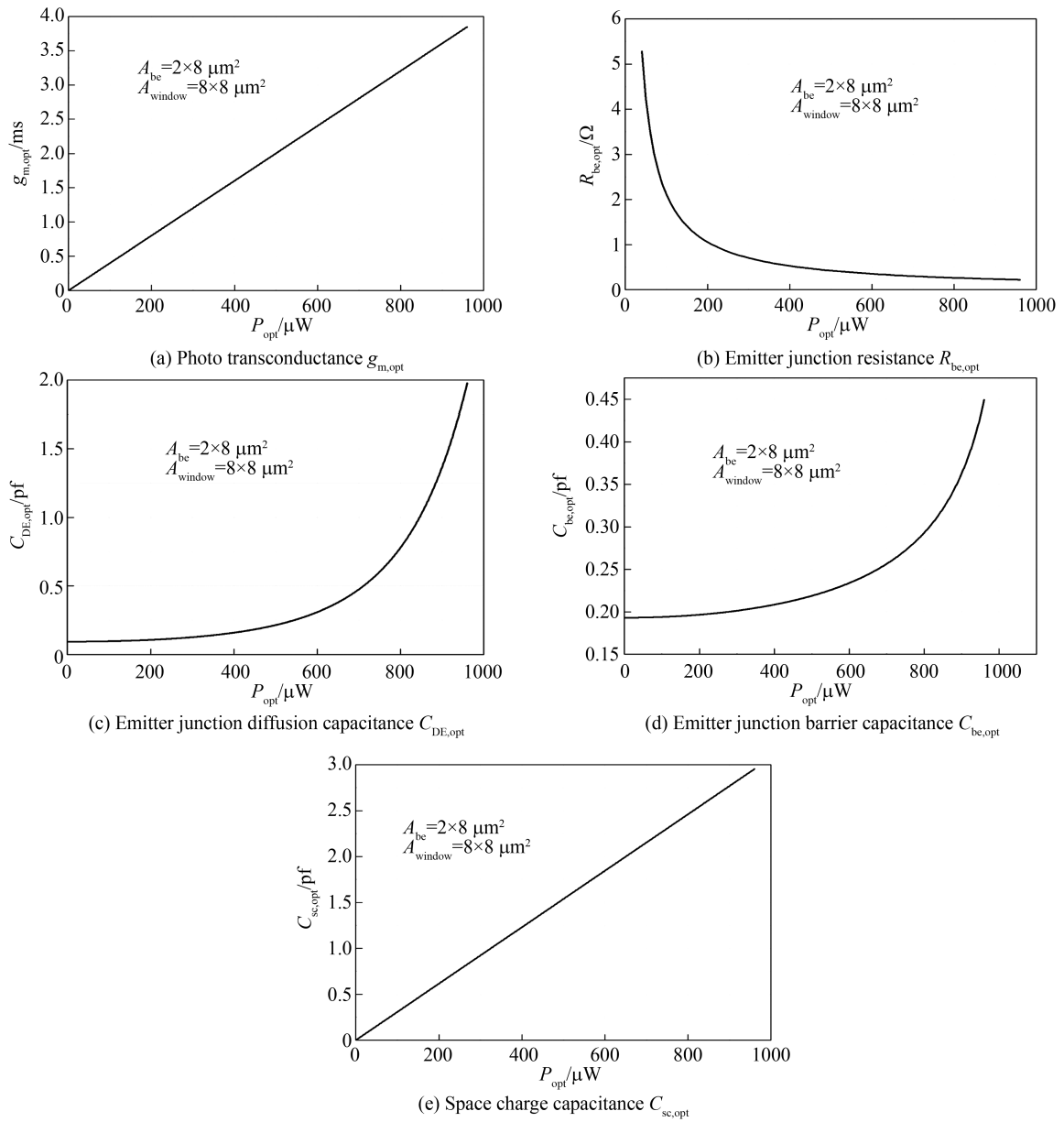


图5 等效电路中各元件随入射光功率的变化曲线

Fig.5 Variation curves of elements in the equivalent circuit with optical power

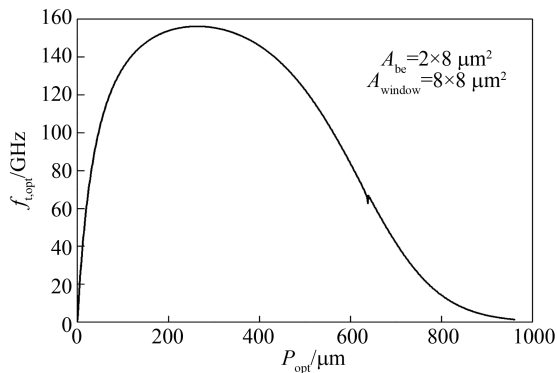


图6 光生特征频率 $f_{T,opt}$ 随光功率的变化关系
Fig.6 Variations of optical characteristic frequency $f_{T,opt}$ as a function of optical power

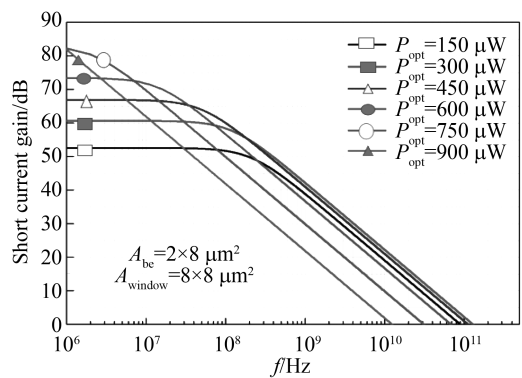


图7 不同光功率下 UTC-DHPT 短路电流增益随频率的变化关系
Fig.7 Short current gain dependences on frequency of UTC-DHPT under different optical power

4 结论

本文基于 HBT 的小信号等效电路模型,考虑载流子产生方式将光生电子电流作为基极偏置电流引入基区,建立了单载流子传输双异质结光敏晶体管 UTC-DHPT 的小信号等效电路模型.在光照情况下,光跨导、发射结的势垒电容、扩散电容和集电结空间电荷电容随着入射光功率的增大而增大,发射结电阻随着入射光功率的增大而减小.根据所建模型,分析了 UTC-DHPT 的光特征频率和光电流增益受光窗口面积和入射光功率的影响.在相同的人射光功率下,会存在一个获得光特征频率最大值的最佳光窗口面积;随着入射光功率的增加,最佳光窗口面积在 $50\sim 100\ \mu\text{m}^2$ 的范围内发生变化.在固定光窗口面积($8\times 8\ \mu\text{m}^2$)时,随着入射光功率的增加,光特征频率 $f_{T,\text{opt}}$ 先增大后减小,在入射光功率为 $280\ \mu\text{W}$ 时达到最大值 $150\ \text{GHz}$.光短路电流增益 $h_{fe,\text{opt}}$ 不断增大,在光功率为 $750\ \mu\text{W}$ 时达到饱和值 $82\ \text{dB}$.

参考文献

- [1] HASSAN A K, REZAZADEH A A. Analytical modeling of the spectral response of heterojunction phototransistors[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2009, **30**(11): 1158-1160.
- [2] BEATA S, MAREK P. Simulations of AlGaAs/GaAs heterojunction phototransistors[J]. *Central European Journal of Physics*, 2011, **9**(4): 1114-1121.
- [3] KHAN H A, REZAZADEH A A, SARMAD S. Detailed analysis on the spectral response of InP/InGaAs HPTs for optoelectronic applications[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, **48**(5): 576-580.
- [4] ROUVALIS E, CHTIOUI M, DIJKF V, et al. 170 GHz uni-traveling carrier photodiodes for InP-based photonic integrated circuits[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(18): 20090-20095.
- [5] GHADIMI A. Modeling and operation analysis of a three-terminal heterojunction bipolar phototransistor [C]. International Conference on Electrical Engineer, 2009, **01**: 444-447
- [6] OGURA M, CHOI S W, FURE S, et al. Effects of Zn doped mesa sidewall on gain enhanced InGaAs/InP heterobipolar phototransistor[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, **46**(2): 214-219.
- [7] HUO Wen-juan, XIE Hong-yun, LIANG Song, et al. Uni-traveling-carrier double heterojunction phototransistor photodetector[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(22): 228501.
霍文娟,谢红云,梁松,等.单载流子传输的双异质结光敏晶体管探测器的研究[J].物理学报,2013,**62**(22):228501.
- [8] JIANG Zhi-yun, XIE Hong-yun, ZHANG Liang-hao, et al. Analysis on high speed response of a uni-traveling-carrier double hetero-junction phototransistor[J]. *Chinese Physics B*, 2015, **24**(4): 048504.
- [9] WANG L, ZHAO L, PAN J, et al. A new phototransistor with uni-travelling-carrier and optically gradual coupling properties[J]. *Opto-electronics Review*, 2009, **17**(3): 242-246.
- [10] KHAN H A. Photoresponse modeling and analysis of InGaP/GaAs double-HPTs.[J]. *IEEE Journals of Quantum Electronics*, 2014, **50**(12): 1-8.
- [11] CHANG Guo-en, RIKMANTRA B, MUKHOPADHYAY B, et al. Design and modeling of GeSn- based heterojunction phototransistors for communication applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, **22**(6): 871-881.
- [12] POLLEUX J, PASZKIEWICZ L, BILLABERT A, et al. Optimization of InP-InGaAs HPT gain: design of an opto-microwave monolithic amplifier[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2004, **52**(3): 871-881.
- [13] FUKANO H, TAKANASHI Y, FUJIMOTO M, et al. High-speed InP-InGaAs heterojunction phototransistors employing a nonalloyed electrode metal as a reflector[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, **30**(12): 2889-2895.
- [14] 陈星弼,张庆中.晶体管原理与设计.电子工业出版社.2006:168-172.
- [15] ZHAO Yong-bing, ZHANG Yun, CHENG Zhe, et al. Al₂O₃/AlGaIn/GaN MOS-HEMT with high on/off drain current ratio[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(5): 578-582.
赵勇兵,张韵,程哲,等.具有高开启/关断电流比的 Al₂O₃/AlGaIn/GaN 金属氧化物半导体高电子迁移率晶体管[J].发光学报,2016,**37**(5):578-582.
- [16] 施敏,伍国珏.半导体器件物理[M].耿莉,张瑞智.第三版.西安交通大学出版社.2011:501.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Nos.61604106, 61574010, 61006044, 61774012), Beijing Future Chip Technology Advanced Innovation Center Research Fund (No.KYJJ2016008), Beijing Natural Science Foundation of China (Nos.4122014, 4142007), Shandong Natural Science Foundation of China (No.ZR2014FL025)