

引用格式: XIE Hong-yun, GUO Min, MA Jia-jun, *et al.* Optical Response Analysis of Tapered Coupled Ridge Waveguide Transistor Detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12): 1248002

谢红云, 郭敏, 马佳俊, 等. 渐变耦合脊波导晶体管探测器光响应分析[J]. 光子学报, 2019, **48**(12): 1248002

# 渐变耦合脊波导晶体管探测器光响应分析

谢红云<sup>1</sup>, 郭敏<sup>1</sup>, 马佳俊<sup>1</sup>, 高杰<sup>1</sup>, 陈亮<sup>2</sup>, 马佩<sup>1</sup>, 刘先程<sup>1</sup>, 张万荣<sup>1</sup>

(1 北京工业大学 信息学部 电子科学与技术学院, 北京 100124)

(2 泰山学院 物理与电子工程学院, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 为提高 InP 基光探测器的吸收效率和工作速度, 设计了一种渐变耦合脊波导单载流子传输异质结光敏晶体管探测器。采用有效折射率法和光束传播法, 分析渐变耦合脊波导的光传输模式, 优化后波导宽度和波导长度分别为 2.6  $\mu\text{m}$  和 250  $\mu\text{m}$ , 可实现单模传输和高的光吸收效率。由于渐变耦合脊波导单载流子传输异质结光敏晶体管光传输方向与载流子运动方向垂直, 分别优化光敏晶体管的吸收效率和速度, 器件输出光电流和特征频率均得到改善。渐变耦合脊波导单载流子传输异质结光敏晶体管的响应度为 33.83 A/W, 饱和输出光电流为 90 mA, 最高特征频率达到 87 GHz, 其饱和输出电流和特征频率相比于台面单载流子传输异质结光敏晶体管分别提高了 20% 和 24%。但渐变耦合脊波导单载流子传输异质结光敏晶体管吸收体积大, 获得饱和和电流时的光功率也比较大, 因此渐变耦合脊波导单载流子传输异质结光敏晶体管的响应度略小于台面的单载流子传输异质结光敏晶体管的响应度。

**关键词:** 异质结光敏晶体管; 单载流子传输; 光束传播法; 响应度; 光学特征频率

中图分类号: TN2

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194812.1248002

## Optical Response Analysis of Tapered Coupled Ridge Waveguide Transistor Detector

XIE Hong-yun<sup>1</sup>, GUO Min<sup>1</sup>, MA Jia-jun<sup>1</sup>, GAO Jie<sup>1</sup>, CHEN Liang<sup>2</sup>,  
MA Pei<sup>1</sup>, LIU Xian-cheng<sup>1</sup>, ZHANG Wan-rong<sup>1</sup>

(1 College of Electronic Science and Technology, Faculty of Information Technology,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2 College of Physics and Electronic Engineering, Taishan University, Taian, Shandong 271000, China)

**Abstract:** To improve the responsivity and working speed of an InP-based optical detector, an uni-traveling carrier heterojunction phototransistor with gradual coupled ridge waveguide is designed. The optical transmission mode of the gradual coupled ridge waveguide is analyzed through effective index method and beam propagation method, and the waveguide width and length are optimized as 2.6  $\mu\text{m}$  and 250  $\mu\text{m}$  respectively to achieve single mode transmission and high absorption efficiency. Because the direction of optical transmission is perpendicular to the direction of carrier motion, the absorption efficiency and speed of the phototransistor are optimized, and the output photocurrent and characteristic frequency of the device are improved. The responsivity is 33.83 A/W, the saturation output photocurrent reaches 90 mA and the highest characteristic frequency is 87 GHz. Compared to the vertical-illuminated uni-traveling carrier heterojunction phototransistor, the saturated output current and characteristic

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.61604106, 61774012, 61574010), 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.4192014, 4122014, 4142007), 山东省自然科学基金项目(No.ZR2014FL025)

第一作者: 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: 2019-06-12; 录用日期: 2019-08-30

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

frequency of the uni-traveling carrier heterojunction phototransistor with gradual coupled ridge waveguide are increased by 20% and 24% respectively. However, the uni-traveling carrier heterojunction phototransistor with gradual coupled ridge waveguide has a bigger absorption volume, and then the input light power at which it gets the saturation current is larger too, therefore its responsivity is slightly smaller than that of the vertical-illuminated uni-traveling carrier heterojunction phototransistor.

**Key words:** Heterojunction phototransistor; Gradual coupled ridge waveguide; Beam propagation method; Responsivity; Optical characteristic frequency

**OCIS Codes:** 040.0040; 040.5160; 230.7370

## 0 引言

随着信息化时代的到来,社会对信息的需求量成几何级数增长,而光电子技术正是信息技术的核心载体,其中光探测器是光信号转换的关键器件.作为光探测器的异质结光敏晶体管(Heterojunction Phototransistor, HPT)集成了探测吸收与光电放大功能,近年来成为光电子器件领域的研究热点之一<sup>[1-3]</sup>.

KAMITSUNA H等<sup>[4]</sup>报道了60 GHz带宽的InP/InGaAs HPT,在 $V_{cc}=1.3$  V,  $I_c=14$  mA的工作条件下,器件的响应度为0.13 A/W,频率最大值达到145.7 GHz. WANG Zhang等<sup>[5]</sup>报道的In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP HPT,基区厚度为800 nm且基极偏置电压为2 V的条件下,器件响应度达到了38.83 A/W.上述报道中HPT采用的是单异质结外延结构和垂直面入射结构,基区和集电区同为光吸收区,产生光生载流子.由于空穴的迁移率较低,其在集电区中的缓慢输运严重限制了器件的光电响应速度.为了缩短光生载流子尤其是光生空穴从集电区漂移至发射结的渡越时间,提高器件工作速度,需要薄的基区和集电区,而为提高器件光吸收效率并获得高的光响应度,则需要厚的基区和集电区.因此台面结构的单异质结光敏晶体管器件在光的高效探测和高速工作的优化上会出现矛盾.

2012年,ROUVALIS E等<sup>[6]</sup>报道了一种适用于光子集成的UTC-PD,其3 dB带宽达170 GHz,该光电探测器应用了单载流子传输(Uni-traveling Carrier, UTC)的思想,仅采用重掺P区吸收入射光,只有电子作为载流子流过结区,缓解了空穴迁移率低对器件工作速度的限制.2008年,KLAMKIN J, MADISON S M, OAKLEY D C等<sup>[7]</sup>提出了一种平板耦合光波导光电二极管,其光吸收程度增加到2 mm,光电流达到250 mA.耦合光波导结构中光从波导端面入射,光的传输方向和载流子的运动方向垂直,光的吸收不再受限于吸收区的厚度,因此可以设计薄的吸收层来提高器件的响应速率,同时通过增加波导长度以提高器件的吸收率.

本文提出一种InP基渐变耦合脊波导单载流子传输异质结光敏晶体管(Uni-traveling Carrier Heterojunction Phototransistor with Gradual Coupled Ridge Waveguide, GCR UTC-HPT),利用单载流子传输机制提高器件的光电响应速度,同时采用渐变耦合脊波导结构,使光传输方向与载流子运动方向垂直,缓解器件在光响应度和光响应速度优化时的矛盾.

## 1 渐变耦合脊波导UTC-HPT的器件结构

图1为InP基渐变耦合脊波导单载流子传输双异质结光敏晶体管(GCR UTC-HPT)的材料结构和折射率分布图.详细的外延结构如表1,该结构与文献[8]的台面UTC-HPT的外延结构一致.N型欧姆接触层InGaAs的掺杂浓度为 $10^{19}$  cm<sup>-3</sup>,厚度为100 nm.n型InP盖层的掺杂浓度为 $10^{19}$  cm<sup>-3</sup>,厚度为1 800 nm.InP发射区掺杂浓度为 $10^{17}$  cm<sup>-3</sup>,厚度为50 nm.基区采用高掺杂( $10^{18}$  cm<sup>-3</sup>)的p型InGaAsP,厚度为100 nm,带隙为0.80 eV,带隙波长为1.55 μm,为GCR UTC-HPT的光吸收区.基区高的掺杂浓度使作为多子的光生空穴容易发生散射和快速弛豫,消除空穴低迁移率对器件工作速度的影响,实现电子的单载流子传输<sup>[9-11]</sup>.集电区采用带隙为1.12 eV,掺杂浓度为 $10^{16}$  cm<sup>-3</sup>的n型InGaAsP,厚度为400 nm.为了降低集电结导带尖峰,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.

GCR UTC-HPT初步设计的波导宽度为3 μm,台面宽度为6 μm,波导长度为100 μm,对应发射极条宽为3 μm,条长为100 μm,图1中阴影区域的基区、集电区和次集电区构成渐变耦合脊波导.波长为1.55 μm的入射光从端面入射并沿z方向传输,进入基区的入射光直接被吸收,进入集电区和次集电区的入射光在传播过程中通过渐变耦合进入基区被吸收.仅10 nm的过渡层1对基区入射光的吸收和实现单载流子传输

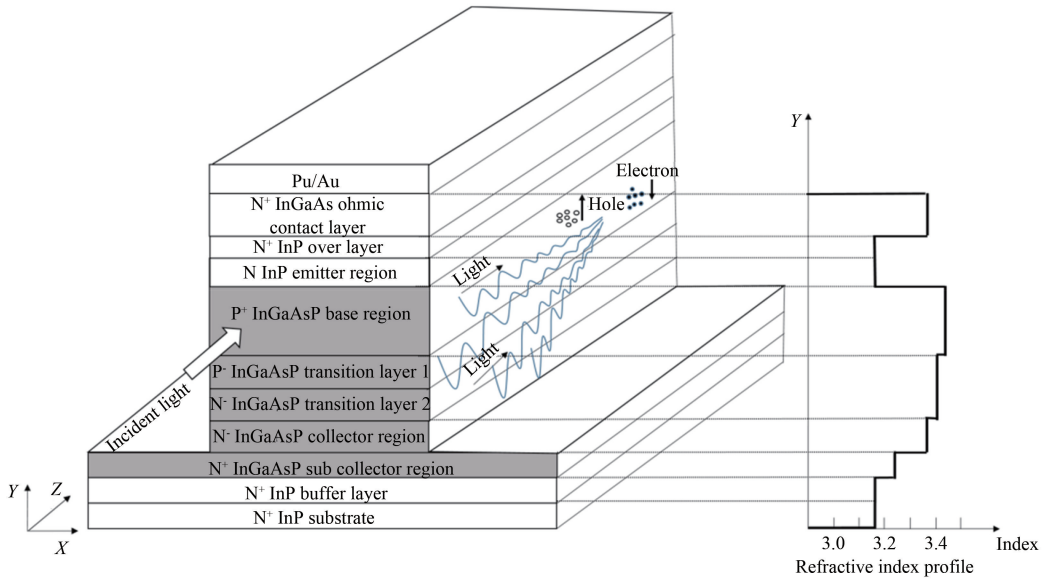


图1 渐变耦合脊波导 UTC-HPT 结构示意图

Fig.1 Structure of UTC-HPT with gradual coupled ridge waveguide

表1 GCR UTC-HPT 外延参数

Table 1 Epitaxial-layer parameters of the GCR UTC-HPT

Layer	Material	Doping/cm <sup>-3</sup>	Thickness/nm	Band gap/eV
Ohmic contact layer	n <sup>+</sup> ; InGaAs	10 <sup>19</sup>	100	0.75
Overlayer	n <sup>+</sup> ; InP	10 <sup>19</sup>	1 800	1.35
Emitter region	n; InP	10 <sup>17</sup>	50	1.35
Base region	p <sup>+</sup> ; InGaAsP	10 <sup>18</sup>	100	0.80
Transition layer 1	p <sup>-</sup> ; InGaAsP	10 <sup>15</sup>	10	0.80
Transition layer 2	n <sup>-</sup> ; InGaAsP	10 <sup>15</sup>	10	0.88
Collector region	n <sup>-</sup> ; InGaAsP	10 <sup>16</sup>	400	1.12
Subcollector region	n <sup>+</sup> ; InGaAsP	10 <sup>19</sup>	1 000	1.12
Buffer layer	n <sup>+</sup> ; InP	10 <sup>19</sup>	500	1.35
Substrate	n <sup>+</sup> ; InP	IS.I	2 500	1.35

的影响小,这里可以不考虑。

与台面结构的 UTC-HPT 相比,采用渐变耦合脊波导结构的 UTC-HPT 器件入射光从波导的端面入射,光传输方向与载流子的运动方向垂直,光的吸收不再受限于吸收区的厚度,因此可以减小基区厚度,通过增加波导长度提高器件的吸收体积,基区内能够产生更多的光生载流子,实现器件对光吸收效率的优化,因此 GCR UTC-HPT 器件期望有更高的饱和输出电流。同时光的传输方向和载流子运动方向垂直,可以独立优化响应度和响应速度。单载流子传输机制的应用缩短了光生载流子尤其是光生空穴从集电区漂移至发射结的渡越时间,只有光生电子由基区传输到集电区,电子的高迁移率得到了很好的利用,提高了器件的工作速度。因此渐变耦合脊波导结构的 UTC-HPT 器件期望能够获得更高的光学特征频率,有效缓解 InP 基 HPT 器件在优化光响应度和光响应速度上存在的矛盾。

## 2 渐变耦合脊波导的设计与优化

### 2.1 渐变耦合脊波导模场分析

如图1所示的直角坐标系,选取水平 X 方向的正方向由左向右,坐标零点在器件正中,竖直 Y 方向的正方向由下向上,坐标零点在器件底端,Z 方向垂直纸面向内,坐标零点在器件端面,1.55 μm 入射光在 Z=0 的端面处入射进入波导,沿 Z 方向传输。通常 GCR UTC-HPT 的渐变耦合脊波导中会有 TE 模或 TM 两种模式存在<sup>[12-14]</sup>,图2和图3分别为传输至 Z=100 μm 时 TE 模和 TM 模的模场分布图。

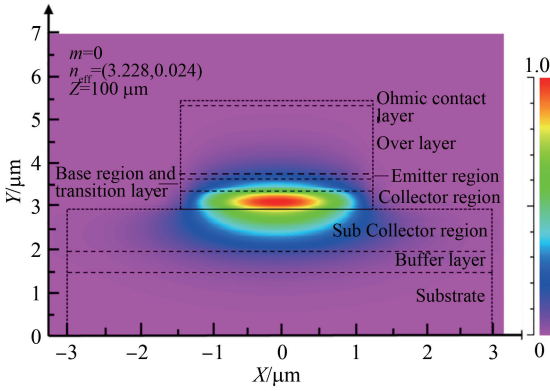


图2 GCR UTC-HPT 光波导的 TE 模场分布  
Fig.2 TE mode field distribution of GCR  
UTC-HPT waveguide

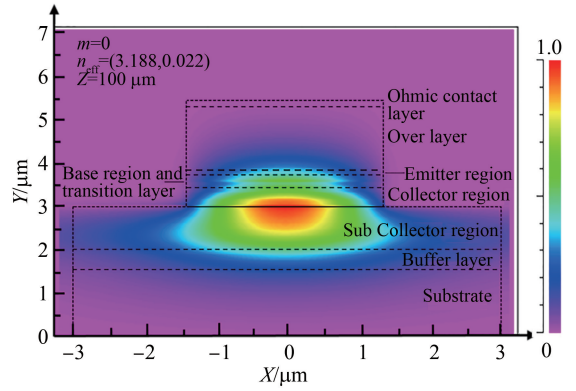


图3 GCR UTC-HPT 光波导的 TM 模场分布  
Fig.3 TM mode field distribution of GCR  
UTC-HPT waveguide

由图 2、图 3 可知,TE 模式在  $X$  方向上的坐标范围约为  $-1.58 \sim 1.58 \mu\text{m}$ ,在  $Y$  方向上的坐标分布是  $1.8 \sim 3.7 \mu\text{m}$ ,大致对应次集电区到基区范围,光基本被限制在波导中,而 TM 模式在整个  $X$  方向上均有分布,在  $Y$  方向上的坐标范围是  $1.3 \sim 4.4 \mu\text{m}$ ,光场分布比较分散,超出了波导范围.因此确定波导中的主要传输模式为 TE 模式,本文后续以 TE 模式为主展开结构优化和分析.

## 2.2 渐变耦合脊波导宽度优化

为了保证脊波导能实现单模传输,需要优化波导的几何参数,包括脊宽、内脊高和外脊高.由表 1 所给的 GCR UTC-HPT 的外延结构参数可确定器件的内脊高  $H$  为  $3.97 \mu\text{m}$ ,外脊高  $h$  为  $2.02 \mu\text{m}$ .S.P.Pogossian 利用有效折射率法 (Effective Index Method, EIM)<sup>[15]</sup> 优化脊宽保证波导的单模传输, EIM 的单模条件为

$$t \leq \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (1)$$

式中,  $t = \omega_{\text{eff}}/H_{\text{eff}}$ ,  $r = h_{\text{eff}}/H_{\text{eff}}$ ,  $\omega_{\text{eff}} = \omega + 2\gamma_c/\{k(n_f^2 - n_c^2)^{1/2}\}$ ,  $h_{\text{eff}} = h + q$ ,  $H_{\text{eff}} = H + q$ ,  $q = \gamma_c/\{k(n_f^2 - n_c^2)^{1/2}\} + \gamma_s/\{k(n_f^2 - n_s^2)^{1/2}\}$ ,  $\omega$  为脊宽,  $n_f$  为波导折射率,  $n_c$  为空气折射率,  $n_s$  为衬底折射率,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为入射光波长,其中  $r$  应满足  $0.5 \leq r \leq 1$ .

根据以上分析,波导中的光以 TE 模式传输,因此  $\gamma_c = 1$ ,  $\gamma_s = 1$ .对于采用的 InP 及 InGaAsP 等材料,  $n_f = 3.343$ ,  $n_c = 1$ ,  $n_s = 3.166$ ,  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ .由此可知,当  $\omega \leq 2.619 \mu\text{m}$  时波导能够满足式(1)的单模条件,避免产生模式间的耦合、色散等负面效应.同时,波导宽度越大,器件的光照面积就越大,故将器件的脊宽  $\omega$  设定为  $2.6 \mu\text{m}$ .

## 2.3 渐变耦合脊波导长度优化

$1.55 \mu\text{m}$  的入射光从渐变耦合脊波导的端面进入波导,入射光在传输过程中逐渐耦合进入基区而被吸收.为了使波导结构的耦合效率最高,光损耗最小,需要确定合适的脊波导长度.

图 4(a)~(c)分别为采用光束传播法 (Beam Propagation Method, BPM) 分析波导长度为  $75 \mu\text{m}$ 、 $150 \mu\text{m}$  以及  $250 \mu\text{m}$  时,脊波导中基区、集电区和次集电区的光传输和吸收情况.图中蓝色的 1 号线表示基区的光功率分布,绿色的 2 号线表示集电区的光功率分布,红色的 3 号线表示次集电区的光功率分布.

从仿真结果可以看出,入射光在波导长度为  $75 \mu\text{m}$  和  $150 \mu\text{m}$  时,集电区仍有光在传输,而基区的光传输基本为零,说明在波导长度为  $75 \mu\text{m}$  和  $150 \mu\text{m}$  处,入射光没有完全被耦合进入基区.在  $250 \mu\text{m}$  处,集电区的光功率有明显下降,此时,基区、集电区和次集电区的光功率基本为零,表明入射光基本耦合进入了基区并被完全吸收.因此,为了保证耦合效率,脊波导的长度选为  $250 \mu\text{m}$ .此时,所设计的渐变耦合脊波导的光限制因子为  $0.022$ ,由于光的吸收主要发生在厚度较薄的基区,因此脊波导对光的限制作用稍弱,光限制因子较小.

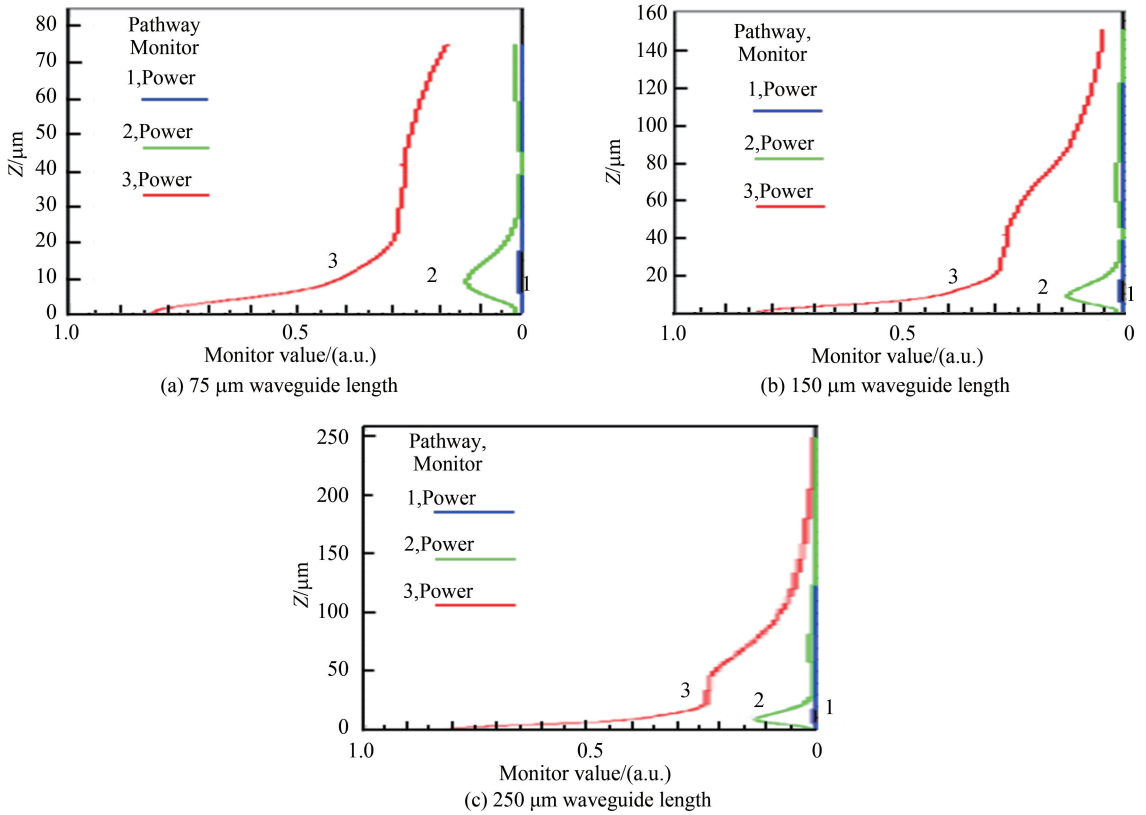


图4 GCR UTC-HPT 的光功率分布  
Fig.4 Optical power distribution of GCR UTC-HPT

### 3 渐变耦合脊波导 UTC-HPT 基本性能

图 5(a)、(b)分别为渐变耦合脊波导 UTC-HPT 在  $1.55 \mu\text{m}$  波长处的光强响应曲线和光特征频率曲线。该 GCR UTC-HPT 器件的波导宽度为  $2.6 \mu\text{m}$ ,波导长度为  $250 \mu\text{m}$ ,工作在二端模式下,即基极处于悬空状态,只有入射光信号为器件提供偏置,集电极-发射极电压  $V_{\text{CE}}$  为  $2 \text{ V}$ 。

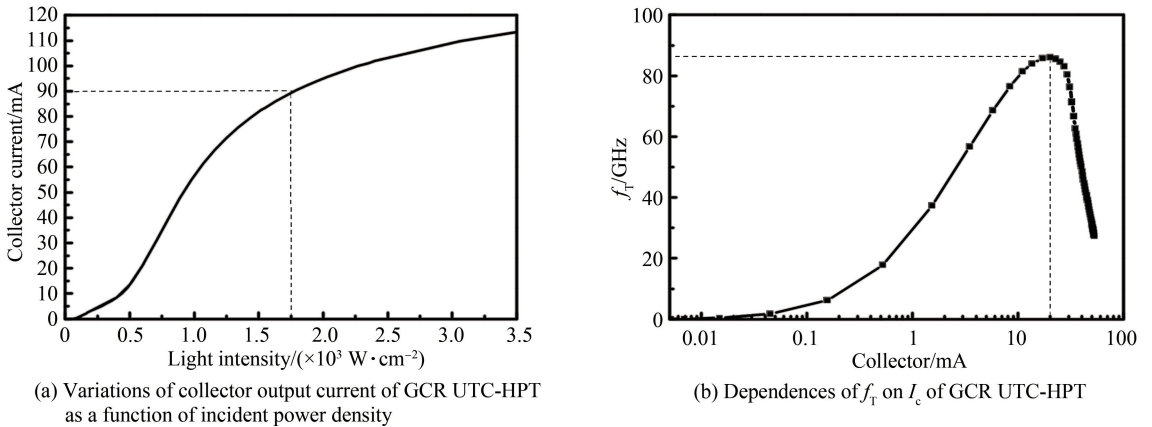


图5 GCR UTC-HPT 基本特性曲线  
Fig.5 Basic characteristic curve of GCR UTC-HPT

从图 5(a)可知,脊波导 UTC-HPT 器件的集电极电流在  $1.750 \text{ W/cm}^2$  入射光强时趋于饱和,集电极饱和电流  $I_c$  达到  $90 \text{ mA}$ ,计算得到响应度为  $33.83 \text{ A/W}$ 。GCR UTC-HPT 因为采用渐变耦合脊波导结构,分离光传输方向和载流子运动方向,波导长度的增加使得光吸收体积变大,吸收的光功率也增加,因此集电极饱和电流高于文献[8]的集电极饱和电流( $75 \text{ mA}$ )。由于波导的限制因子的影响,实现大的电流依赖大的入

射光功率,其光响应度却低于文献[8]的光响应度(34.72 A/W)。

GCR UTC-HPT 器件的光学特征频率与集电极电流的关系如图 5(b)。当电流较小时,因为发射极充电时间很长,特征频率  $f_T$  较低;电流增大时,由于发射极充电时间缩短,特征频率  $f_T$  增高;电流密度继续增大时,产生克尔克效应,晶体管的特征频率很快降低<sup>[16]</sup>。脊波导 UTC-HPT 器件的最大特征频率  $f_T$  能够达到 87 GHz,由于采用单载流子传输和渐变耦合脊波导结构,一方面消除了空穴低迁移率的影响,另一方面光的传输方向和载流子运动方向垂直,可以独立优化响应度和响应速度,相比于文献[8]中 UTC-HPT 器件的最高特征频率(70 GHz)提高了 24%。此时的集电极电流  $I_c$  达到 23 mA,基本与台面结构器件的集电极电流持平(24 mA)。

基于光限制较好的 TE 模展开分析和优化,如前所述波导中存在 TE 模和 TM 模两种模式传输,而目前的波导结构对 TM 模的限制较差,传输过程中 TM 模的损耗较大,后续工作需要进一步优化波导结构甚至设计偏振不敏感的波导增加 TM 模的光限制因子。同时,分析选取了理想的端面入射,即 100% 的入射光进入了波导结构内部被传输和吸收,实际中由于波导结构的脊宽限制,光纤到端面的入射会有部分光损耗,与台面结构较大的光窗口面积(如文献[8]中  $6 \times 1 \mu\text{m}^2$ )相比,损耗可能会更大。因此一方面需要进一步优化波导结构得到更高的光限制因子和端面吸收率,另一方面需要在实际应用中选择单模光纤,并且更严格的调整光纤位置。

## 4 结论

本文设计了一种 InP 基渐变耦合脊波导单载流子传输异质结光敏晶体管(GCR UTC-HPT)。与垂直入射的台面单载流子传输异质结光敏晶体管相比,GCR UTC-HPT 的入射光从端面入射进入波导,光传输方向与载流子运动方向垂直,提供了独立优化光吸收效率和载流子输运速度的机会;仅有高掺杂的基区作为吸收区实现了电子的单载流子传输,缓解了器件响应度和响应速度优化上的矛盾,改善了 GCR UTC-HPT 的输出光电流和特征频率。当波导宽度为  $2.6 \mu\text{m}$ ,波导长度为  $250 \mu\text{m}$ ,设计的渐变耦合脊波导获得了 TE 模的单模传输和高的光耦合效率,GCR UTC-HPT 的最高光特征频率达到 85 GHz,饱和输出光电流为 90 mA,相比于台面单载流子传输异质结光敏晶体管分别提高了 20%和 24%,光响应度为 33.83 A/W,略小于台面结构 UTC-HPT 的光响应度。与相同外延材料的台面结构 UTC-HPT 相比,GCR UTC-HPT 可以得到更高的光特征频率。但目前的波导结构对 TM 模的限制较差,同时由于端面窗口面积较小,光纤到端面的入射存在大的光损耗,因此一方面需要进一步优化波导结构得到更高的光限制因子和端面吸收率,另一方面需要在实际应用中选择单模光纤,并且更严格地调整光纤位置。

## 参考文献

- [1] KHAN H A, REZAZADEH A A, SOHAIB S, *et al.* Detailed analysis on the spectral response of InP/InGaAs HPTs for optoelectronic applications[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, **48**(5): 576-580.
- [2] ZHANG Shang-jian, WANG Heng, ZOU Xin-hai, *et al.* Self-calibrating measurement of high-speed electro-optic phase modulators based on two-tone modulation[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(12): 3504
- [3] OGURA M, CHOI S W, FURUE 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.
- [4] KAMITSUNAH, IDA M, KURISHIMA K. A 60-GHz-band optical injection-locked oscillator using a top/back-illuminated InP/InGaAs HPT[C]. *IEEE International Conference on Indium Phosphide & Related Materials*, IEEE, 2007: 381247
- [5] WANG Zhang, EMANETOGLU N W, BAMBHA N, *et al.* Design and analysis of In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP symmetric gain optoelectronic mixers[J]. *Solid State Electronics*, 2010, **54**(12): 1549-1553.
- [6] ROUVALIS E, CHTIOUI M, VAN DIJK F, *et al.* 170 GHz uni-traveling carrier photodiodes for InP-based photonic integrated circuits[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(18): 20090.
- [7] KLAMKIN J, MADISON S M, OAKLEY D C, *et al.* High-power and high-speed waveguide uni-traveling-carrier photodiodes for microwave photonics applications[C]. *Microwave Symposium Digest*, IEEE, 2011: 5972782.
- [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] SHI T, XIONG B, SUN C, *et al.* Back-to-back UTC-PDs with high responsivity, high saturation current and wide bandwidth[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(2): 136-139.
- [10] LI C, XUE C L, LI C B, *et al.* High bandwidth surface-illuminated InGaAs/InP uni-travelling-carrier photodetector[J].

- Chinese Physics B*, 2013, **22**(11): 118503.
- [11] CHEN Qing-tao, HUANG Yong-qing, FEI Jia-rui, *et al.* Fabrication and characterization of novel high-speed InGaAs/InP uni-traveling-carrier photodetector for high responsivity[J]. *Chinese Physics B*, 2015, **24**(10): 108506.
- [12] KO W S, BHATTACHARYA I, TRAN T T D, *et al.* Ultrahigh responsivity-bandwidth product in a compact InP nanopillar phototransistor directly grown on silicon[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 33368.
- [13] PARK M S, JANG J H. Enhancement of optical gain in floating-base InGaP-GaAs heterojunction phototransistors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(16): 1202-1204.
- [14] NAKAYAMA K, SHOJI Y, MIZUMOTO T. Single trench SiON waveguide TE-TM mode converter[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(15): 1310-1312.
- [15] POGOSSIAN S P, VESCAN L, VONSOVICI A. The single-mode condition for semiconductor rib waveguides with large cross section[J]. *Lightwave Technology Journal of*, 1998, **16**(10):1851-1853.
- [16] XIE Hong-yun, SUN Dan, ZHANG Liang-hao, *et al.* Frequency response analysis of a uni-traveling-carrier double hetero-junction phototransistor[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, **41**(12): 1878-1883.
- 谢红云, 孙丹, 张良浩, 等. 单载流子传输双异质结光敏晶体管频率特性分析[J]. 北京工业大学学报, 2015, **41**(12): 1878-1883.