

# In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As MSM 光电探测器 光电响应速度研究

王庆康 史常忻

上海交通大学 微电子技术研究所， 上海 200030

(1991年4月5日收到；1992年9月28日收到修改稿)

本文通过分析 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 材料的电子漂移速度与电场的非线性关系，研究了 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 金属-半导体-金属光电探测器 (MSM-PD) 的光电响应与指状电极间距离、光吸收层杂质浓度及工作电压之间的关系。研究结果表明，光电响应速度存在最佳值。用计算机辅助分析得到的 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As MSM-PD 的光电响应时间与偏置电压的关系与实验器件实测结果相一致。研究结果为设计高速响应 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As MSM-PD 及建立器件光电响应模型提供了依据。

EEACC: 2530G, 4250, 2520D

## 一、引言

金属-半导体-金属光电探测器 (MSM-PD) 具有工艺简单、平面结构、便于与高速 FET-IC 单片集成的优点，是光电子集成中的重要接收器之一。In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 材料是长波长 (1.3—1.5 μm) 光纤通讯中的理想材料，近年来国内外许多工作致力于研究 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As MSM-PD<sup>[1,2]</sup>。文献[3]报道了对 GaInAs pn 结内电子渡越时间的分析结果。本文结合计算机辅助分析方法，对 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As MSM-PD 的光电响应时间进行了深入的研究。用计算机辅助分析得到的 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As MSM-PD 的响应时间与偏置电压的关系与实验器件实测结果相一致。国内外尚未见这方面研究的报道。研究结果为设计高速响应 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As MSM-PD 及建立器件光电响应模型提供了依据。

## 二、物理模型

MSM-PD 一维模型如图 1。其中  $L_s$  为指状电极间距离。对于图 1 的 MSM-PD 模型，可以得到基本半导体物理方程：

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_s} [N_D - N_C e^{-B(\psi + \phi_s)}], \quad (1)$$

其中， $\phi$  是电位分布， $\phi_s$  是 MSM-PD 结构金属与半导体的肖特基势垒。对于 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As MSM-PD，一般  $\phi_s = 0.3$  伏。 $\epsilon_s$  为 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 的相对介电常数是 13.77。 $N_D$  是杂质浓度、 $N_C$  是有效态密度， $q$  是电子电荷值， $\epsilon_0$  是真空介电常数。对于  $N_D = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ,  $L_s =$

$3.0\mu\text{m}$ , 用 Mayergoz 方法<sup>[4,5]</sup>求解方程(1), 得到的电极间电场分布如图 2. 式(1)中  $\beta = q/kT$ ,  $k$  为波尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度.

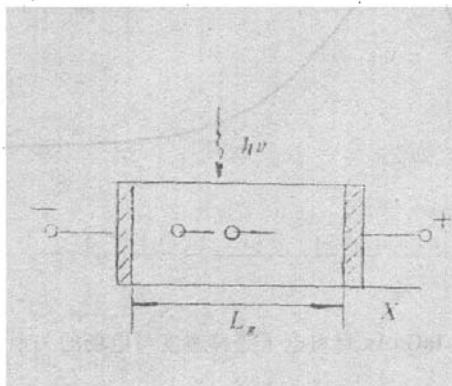


图 1 MSM-PD 一维模型

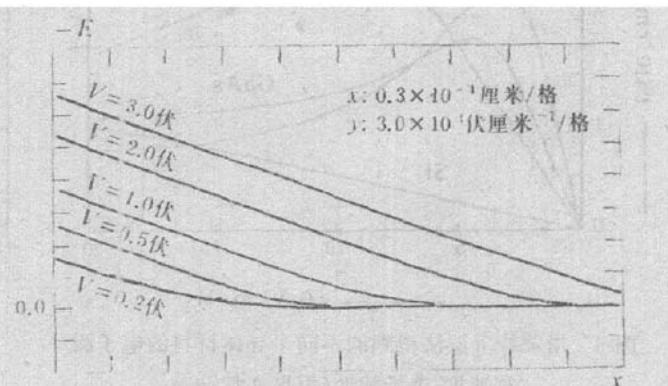


图 2 MSM-PD 指状电极间电场分布

用耗尽近似可以得到 MSM-PD 光吸收层内电场分布的解析表达式:

$$-E(x) = -\frac{qN_D}{\epsilon_0\epsilon_s} \left[ \left( \frac{2\epsilon_0\epsilon_s V}{qN_D} \right)^{1/2} - x \right], \quad V < V_{FB} \quad (2a)$$

$$-E(x) = -\frac{qN_D}{\epsilon_0\epsilon_s} x + \frac{V + V_{FB}}{L_s}, \quad V \geq V_{FB} \quad (2b)$$

其中  $V_{FB}$  是 MSM-PD 的平带电压. 其意义是当 MSM-PD 施加的偏置电压  $V$  等于  $V_{FB}$  时,  $x=L_s$  处能带变平,

$$V_{FB} = \frac{qN_D}{2\epsilon_0\epsilon_s} L_s^2. \quad (3)$$

通过对(2a)、(2b)作图, 可以看出与图 2 的数值解十分符合. 表明(2a)、(2b)是很好的近似解析表达.

要研究 MSM-PD 的光电响应时间, 就要研究光产生电子在 MSM-PD 指间的渡越时间. 文献[5]介绍了 Si、GaAs、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 、InP 四种材料电子漂移速度与电场关系的蒙特卡罗模拟结果(图 3). 从图 3 可以看出  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  材料电子漂移速度与电场关系的非线性程度最大, 最大电子漂移速度是饱和电子漂移速度的近 3 倍. 所以, 如何使  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  MSM-PD 的电子漂移速度尽可能工作在最大电子漂移速度附近, 是设计高速光电响应光电探测器的关键.

对于掺杂浓度小于  $10^{16}\text{cm}^{-3}$  的 InGaAs 材料, 电子的漂移速度与电场的关系有经验公式<sup>[3,7]</sup>:

$$v_E(E) = \frac{\mu_0 E (AE^{-4} + v_s)}{\mu_0 E + AE^{-4} + v_s}, \quad (4)$$

其中  $\mu_0 = 7.5 \times 10^3 \text{cm/vs}$ ,  $v_s = 0.8 \times 10^7 \text{cm/s}$ ,  $A = 2 \times 10^{22} \text{cm}^4/\text{v}^4$ . 式(4)中参数  $\mu_0$ ,  $v_s$  和  $A$ , 可以通过测量  $\mu_0$ ,  $v_s$  和  $v_m$  来得到.  $v_m$  为最大漂移速度,  $v_m = 2.2 \times 10^7 \text{cm/s}$ <sup>[3]</sup>. 式(4)的曲线见图 4.

比较图 3 与图 4, 可以看出二者十分符合. 表明经验公式(4), 对于  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  材料电子漂移速度与电场的关系是很好的解析表达式.

从  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  电子漂移速度与电场的关系, 可以看出 MSM 电极间的电场分布影

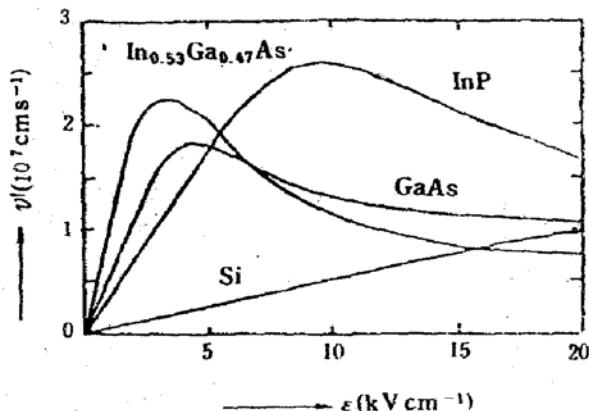


图 3 用蒙特卡罗法得到的不同半导体材料的电子漂移速度-电场特性(引自文献[6])

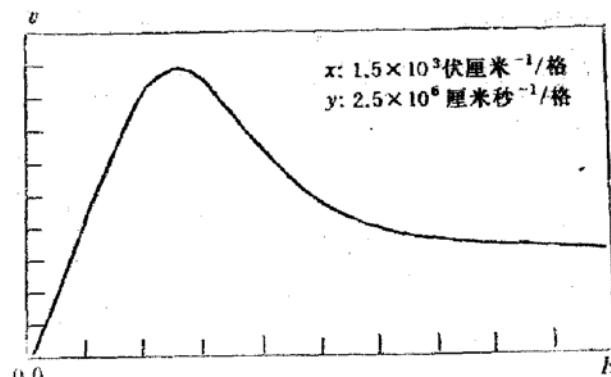


图 4 InGaAs 材料电子漂移速度与电场的关系

响电子在指状电极间的渡越时间。由于在耗尽近似下,当偏置电压  $V < V_{FB}$  时,未耗尽的电荷中性区内电场趋于零,则由(4)式表示的  $v_E$  趋于零。而实际器件中该区域有电子漂移,可以用扩散速度和热运动速度来近似。文献[8]详细研究了肖特基结中扩散速度和热运动速度。但对于 MSM-PD 结构是两只背靠背连着的肖特基结,处理起来较单结复杂。本文在这里不作深入讨论。而采用文献[3]的处理方法,假设在未耗尽的电荷中性区内,电子扩散速度和热运动速度的总贡献为  $v_0$ 。

这样电子在指状电极间的渡越过程在  $V < V_{FB}$  时可分成二个区域,一个区域是耗尽区,另一个是电荷中性区。电子渡越时间是这两个区域内电子渡越时间的总和。

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_1 + \tau_2 \\ &= \int_0^{x_0} \frac{dx}{v_E(E)} + \int_{x_0}^{L_E} \frac{dx}{v_0}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $x < x_0$  为耗尽区,电子在电场作用下的漂移速度为  $v_E(E)$ ,  $x > x_0$  时是电荷中性区,这时电场为零,  $v_E = 0$ ,电子由于扩散和热运动而产生总的漂移速度  $v_0$ 。

但(5)式在物理上产生  $x = x_0$  处,电子漂移速度不连续现象。因此,可以从连续性考虑,假定在  $x < x_0$  耗尽区内扩散和热运动同样存在,并假定也是  $v_0$ 。这样(5)式就表达成:

$$\tau = \int_0^{L_E} \frac{dx}{v_E + v_0}, \quad (6)$$

其中  $v_E$  由(4)式表达。(6)式成立是建立在这样一个假设之上:即在整个本征吸收层内  $0 < x < L_E$ , 存在由于扩散和热运动而产生的电子漂移速度  $v_0$ , 而电子总的漂移速度  $v$  等于  $v_E$  与  $v_0$  之和。

这一假设首先是解决了耗尽区与电荷中性区的电子漂移速度连续性问题,在物理上也是合理的。其次,由于在  $V > V_{FB}$  时,这一假设仅仅体现在  $v_E$  上附加一个很小的常数项,不影响本文所要研究的电子渡越时间存在极值这一物理现象。因此,不影响要研究问题的本质,在物理上是合理的。下文证实了(6)式计算结果与解析分析结果的一致性。

文献[3]对电子漂移速度在电荷中性区与耗尽区之间不连续时作了类似处理,并假定  $v_0 = 0.1v_s$ ,  $v_s$  为电子饱和漂移速度。本文根据与实验拟合,假定  $v_0 = 0.4v_s$ ,  $v_0$  的不同值,只是对下文计算得到的曲线产生一个很小的平移。根据文献[8],  $v_0$  应小于热运动速度  $1.3 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 。

### 三、电子渡越时间极小值及其分析

根据(4)式和(6)式,本文在  $N_D = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  杂质浓度下,对不同电极距离  $L_g$  时, In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As MSM-PD 光吸收层内电子渡越时间进行了数值积分。结果示于图 5。

图 5 中,横坐标是 MSM-PD 的偏置电压与平带电压  $V_{FB}$  的比值,纵坐标是电子在电极间的渡越时间。

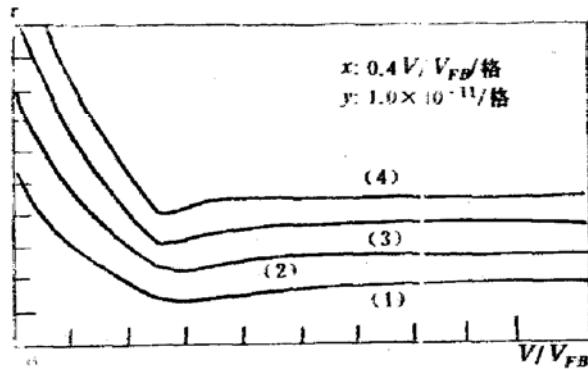


图 5 电子渡越时间与电压的关系( $\tau$ 的单位是秒)

图 5 中曲线(1)—(4)分别对应于  $L_g$  等于  $2.0 \mu\text{m}$ 、 $3.0 \mu\text{m}$ 、 $4.0 \mu\text{m}$  和  $5.0 \mu\text{m}$ 。从图中可以看出  $\tau$  有极小值。

下面来进一步研究在  $L_g$  不变时,不同杂质浓度对电子渡越时间  $\tau$  的影响。这里对于  $L_g = 3.0 \mu\text{m}$ ,计算了杂质浓度  $N_D$  等于  $5.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 、 $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  和  $5.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  时的电子渡越时间,分别对应于图 6 中曲线(1)—(5)。

从图 6 中可以看出,  $N_D$  越小, 渡越时间的极小值越向右移(对应的  $V/V_{FB}$  越大),而且极小值  $\tau$  也减小。图 6 中曲线(1)与其他曲线相交,就是这种极小值位置移动造成的。例:对于曲线(2),随着  $N_D$  减小,曲线(2)的极小值点向右移动,同时稍微向下移动,当  $N_D = 5.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  时,与曲线(1)重合。下文的解析分析,解释了这种电子渡越时间极小值点的移动现象。

从图 6 可以看出,对于  $L_g = 3.0 \mu\text{m}$  的 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As MSM-PD, 杂质浓度  $N_D = 1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (对应曲线(2))是较理想的杂质浓度,不过目前在工艺上有一定难度。文献[2]报道了  $L_g = 3.0 \mu\text{m}$ 、 $N_D = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、 $V_{FB} = 5.7$  伏 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As MSM-PD 的光电响应时间与偏置电压的关系。本文引用如下:

从图 7 与图 6 中曲线(4)进行比较中,可以看出作为一维模型、理论曲线与实测曲线的相符性是令人满意的。理论分析的意义在于给出了进一步改善光电响应时间的方法,并指出存在光电响应时间极小值。

下面对上述计算机辅助研究得到的结果进行分析:

(4)式中,当  $E = E_m$  时,电子漂移速度最大  $v_E = v_{\max}$ ,  $E_m$  满足下式:

$$v_E^2 E^3 + 2v_E A E^4 - 4\mu_0 A E^5 + A^2 = 0 \quad (7)$$

式(7)的近似解为  $E_m \approx 4 \times 10^3 \text{ V/cm}$ 。

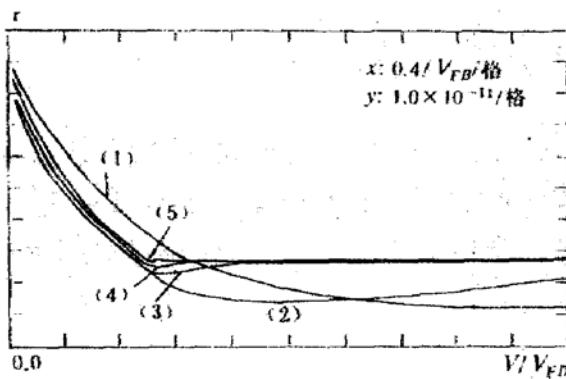


图 6 不同掺杂浓度对电子渡越时间的影响  
( $\tau$  的单位是秒)

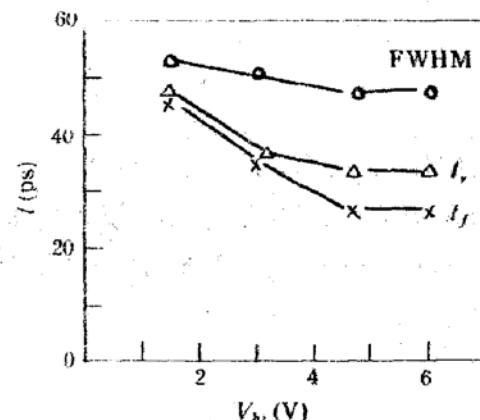


图 7  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  MSM-PD 光电响应时间  
与偏置电压的关系. 引自文献[2]

1) 当  $V < V_{FB}$  时, 随着  $V$  增加, 耗尽区增加. 总的电子渡越时间  $\tau = \tau_1 + \tau_2$ .  $\tau_1$  为电子在耗尽区的渡越时间,  $\tau_2$  为电荷中性区的电子渡越时间. 而在电荷中性区, 电场趋于零, 只有扩散和热运动. 所以随着  $V$  增加,  $\tau$  下降与图 5、图 6 相符.

2) 当  $V > V_{FB}$  时, 这时电场为一线性函数, 式(2b). 从图 4 可以看出, 如果通过调整  $N_D$  和  $L_g$  以及  $V$  在  $0 < x < L_g$  区域内, 使  $E$  在  $x = L_g/2$  处等于  $E_m$ , 则电子漂移速度将落在图 4 曲线的峰值区. 这时  $\tau$  应是最小. 将  $x = L_g/2$  代入(2b)式得:

$$\frac{V}{V_{FB}} = \frac{2E_m\epsilon_0\epsilon_s}{qN_DL_g} \approx 6.1 \times 10^{10}/N_DL_g \quad (N_D \text{ 量纲是 } \text{cm}^{-3}, L_g \text{ 量纲是 } \text{cm}) \quad (8)$$

从(8)式可以看出  $N_DL_g$  越大, 电子渡越时间处于极小值的偏置电压值越接近  $V_{FB}$ . 图 5 和图 6 都反应了这一现象. (8)式成立的条件是  $V/V_{FB} > 1$ , 即

$$N_DL_g < \frac{2E_m\epsilon_0\epsilon_s}{q} \approx 6.1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \quad (9)$$

对于图 6 中曲线(1)和(2)满足(9)式, 可以由(8)式来计算电子渡越时间处于极小值时的偏置电压值. 由(8)计算得到对于曲线(1),  $V/V_{FB} \approx 4$ . 对于曲线(2),  $V/V_{FB} \approx 2$  与图 6 中曲线(1)、(2)所显示的结果相符.

从(2b)式可知,  $0 < x < L_g$  区域内电场的线性分布的斜率为  $\frac{qN_D}{\epsilon_0\epsilon_s}$ . 从图 4 可知, (2b)式的斜率越小, 则电子漂移速度就越落在曲线峰值区的高端区域. 所以  $N_D$  越小, 极小值就越明显. 图 6 反应了这一现象.

3) 当  $V > V_{FB}$ , 且进一步增大时, 使得在  $0 < x < L_g$  区域内最小电场大于  $E_m$  ( $E_m$  定义如前), 则随着  $V$  增加,  $0 < x < L_g$  区域内电子漂移速度进一步减小,  $\tau$  出现上升现象, 也即出现电子渡越时间饱和现象.

从(2b)可得, 当  $V$  满足下式时, 电子渡越时间开始出现饱和现象

$$-q \frac{N_D}{\epsilon_0\epsilon_s} L_g + \frac{V + V_{FB}}{L_g} > E_m \quad (10)$$

(10)式可表达成  $\frac{V}{V_{FB}} > 1 + \frac{2E_m\epsilon_0\epsilon_s}{qN_DL_g} \approx 1 + \frac{6.1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}}{N_DL_g}$  (11)

对于图 6 中曲线(1)–(5), 由(11)式计算得到的电子渡越时间开始饱和时, 电压与  $V_{FB}$  之

比分别为 5、3、1.4、1.2、1.04。与图 6 中曲线所显示的饱和现象符合很好。

以上详细分析了由于  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  电子漂移速度与电场有很强的非线性关系, 导致电子渡越时间存在极小值的机理。其中式(8)和式(11)对于设计  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  MSM-PD 的  $N_D$  和  $L_s$  是有用的。

#### 四、结 论

由于  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  材料的电子漂移速度与电场之间存在很强的非线性关系, 使得 MSM-PD 光吸收层内电子在金属指状电极间的渡越时间存在极小值。这一极小值与杂质浓度  $N_D$  及指状电极间距离  $L_s$  相关。用计算机辅助分析得到的  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  MSM-PD 的响应时间与偏置电压之间的关系与实验器件实测结果符合较好。研究结果为设计高速响应  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  MSM-PD 及建立器件光电响应模型提供了依据。

#### 参 考 文 献

- [1] L. Yang et al., *IEEE Photonics Technology Lett.*, **2**(1), 5f (1990).
- [2] 史常忻、K. Heime, 半导体学报, **12**(12), 767(1991).
- [3] M. Smiljanic, Z. Djuric, et al., *Electronics Letters*, **25**(2), 150(1989).
- [4] I. D. Mayergoyz, *J. Appl. Phys.*, **59**(1), 195(1986).
- [5] 赵鸿麟, 固态电子学研究与进展, **10**(2), 164(1990).
- [6] Klaus Heime, "In GaAs Field-Effect Transistors", by Research Studies Press Ltd. Taunton, Somerset, England 1989.
- [7] Littlejohn, M. A., Glisson et al., "GaInAsP alloy Semiconductors" (Wiley. NY. 1982).
- [8] [美]施敏著, "半导体器件物理", 第五章, 电子工业出版社, 北京(1987)。

### Investigation on Photo-Electronic Response Time of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ MSM Photodetector

Wang Qingkang and Shi Changxin

*Institute of Microelectronic Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030*

(Received 5 April 1991; revised manuscript received 28 September 1992)

#### Abstract

Using the method of computer-aided analysis, the transit time through a metal-semiconductor-metal structure photodetectors (MSM-PD) as a function of applied voltage and other parameters is calculated. It is shown that a minimum transit time exists in MSM-PD structure because of the stronger nonlinear relationship between the electron velocity and electric field in  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ . The calculated result fits well with the measurement datum of the response time of  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  MSM-PD against the applied voltage. The results can be used for design of high speed response MSM-PD and modelling the response time of metal-semiconductor-metal structure photodetector.

EEACC: 2530G, 4250, 2520D