

皮秒激光脉冲触发下光电导开关 响应时间的理论计算*

李学清 郭开周 陈增圭

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

摘要 本文采用计算机数值分析的方法, 分析了激光脉冲的能量、宽度、半导体对光的吸收系数、半导体的表面复合、体复合以及俄歇复合等因素对光电导开关响应时间的影响。结果表明, 光电导开关的响应虽然很快, 但与光脉冲并不完全同步, 而有一个短的时间滞后。

关键词 光电导开关; 响应时间; 时间滞后; 吸收系数; 载流子复合; 激光脉冲

1. 引言

近年来激光技术得到高度发展, 能够产生皮秒和飞秒的激光脉冲。这大大促进了半导体光电导开关器件的进展。由于光电导开关具有开关速度快、触发漂移小、控制信号与输出信号完全隔离等优点, 越来越受到人们的重视。文献[1]报道, 利用光电导开关与发射天线的组合, 在7000V的偏压下, 产生了400ps 800kW的功率, 天线传输效率~65%。利用高功率皮秒电磁脉冲已能在实验室获得F-117A和B-1隐身飞机的图象。IBM公司^[2]利用他们的光电导开关-天线系统, 可以迅速测量试样在10~130GHz范围内的复介电常数。在对大规模集成电路的非损伤测量和相控阵方面^[3]的实验也是颇有成效的。但是所有文章在谈及皮秒激光脉冲作用下光电导开关响应时间问题时, 结论都是“响应时间极快”。本文的研究发现两者之间有一个短的时间滞后。

2. 理论分析和计算结果

激光脉冲照射到半导体上, 半导体吸收光子产生电子空穴对, 半导体内的导带中电子和价带中空穴数目增加, 形成非平衡附加载流子。载流子浓度的时变率由连续性方程描述^[4]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - R + g(t, x) \quad (1)$$

式中 D^* 为双极扩散系数, R 为载流子的复合率, $g(t, x)$ 为载流子的产生函数。本文计

1991.11.15 收到, 1992.03.02 定稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

李学清 男, 1966年生, 硕士研究生, 从事皮秒光电导开关方面的研究。

郭开周 男, 1938年生, 研究员, 现从事光控微波固态线路和利用激光触发半导体光电导开关产生皮秒电磁脉冲的研究。

陈增圭 男, 1942年生, 研究员, 现研究领域和主要兴趣为电子回旋脉塞、自由电子激光以及光与微波的相互作用等。

算时, R 包括体复合率和俄歇复合率。表面复合率反应在(1)式的边值条件中。产生函数

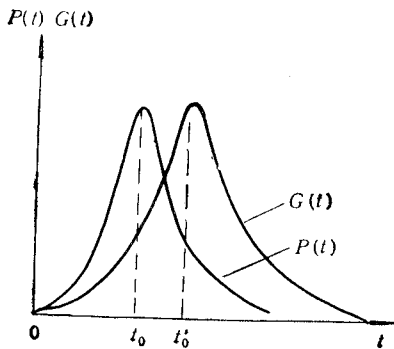


图1 激光脉冲和光电导响应
 $P(t)$ 为激光脉冲; $G(t)$ 为光电导响应

$g(t, x)$ 与激光脉冲有关。计算时假定激光脉冲在时间上为高斯形, 且均匀照射到开关表面上。由于(1)式是一个准线性抛物型方程, 用解析方法不能求解。本文采用计算机数值分析的方法求解。具体的求解方法在有关计算机数值分析的书中都可以找到, 此处不再详述。计算中所用的参数值为: 激光波长 $\lambda = 610\text{nm}$, 峰值出现时刻 $t_0 = 20\text{ps}$, 双极扩散系数 $D^* = 20\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。计算结果和有关分析如下:

(1) 激光脉冲功率对光电导开关响应时间的影响

当激光脉冲的峰值功率为 1000W , 100W 和 20W 时, 光电导峰值出现的时刻分别为 24ps , 27ps 和 31ps 。它们相对于激光脉冲分别滞后 4ps , 7ps 和 11ps 。可见在开关没有饱和时, 随着激光脉冲功率的增加, 光电导开关响应速度加快。当光电导达到最大值时, 半导体内的载流子数目最多。此时载流子总的产生率等于复合率。如图1所示, 在 t_0 时刻激光脉冲功率达到峰值, 此时载流子产生率最大。当 $t_0 < t < t'$ 时载流子的产生率逐渐减小, 但仍然大于载流子的复合率, 所以载流子的数目仍在增加, 光电导也增大。当 $t = t'_0$ 时, 复合率与产生率相等, 载流子数目达到最大值, 光电导也达到最大值。此后, $t > t'_0$, 载流子产生率逐渐减小, 复合率大于产生率, 导致载流子总数逐渐减少, 光电导也逐渐减小。图1中 $\Delta t = t'_0 - t_0$ 就是光电导开关响应相对于激光脉冲的滞后。激光脉冲能量增加时, 载流子的产生率增加, 载流子的浓度 n 随之增加。由于 $R = rn^2 + C_A n^3$ (r 为复合系数, C_A 为俄歇系数), 导致复合率也增加, 而且比产生率增加的快, 因而使 t'_0 变小; Δt 变短。

(2) 俄歇系数对光电导开关响应时间的影响 俄歇复合与 n^3 成正比, 只有在 n 很大 (10^{20}cm^{-3}) 时, 俄歇复合才会起主要作用。计算结果也得到了相同的结论。当激光脉冲峰值功率 $P_0 = 20\text{W}$ 时, 俄歇复合几乎不起作用。但当 $P_0 = 1000\text{W}$ 时, 俄歇复合的作用已成了复合的主要因素。俄歇系数为 $1.4, 5.0, 9.0 (\times 10^{-31}\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1})$ 时, 计算得 Δt 分别为 2.6ps , 2.8ps 和 3ps 。可见俄歇系数对光电导最大值出现的时间影响较小。

(3) 半导体的吸收系数对光电导开关响应时间的影响 吸收系数为 $2 \times 10^4\text{cm}^{-1}$, $5 \times 10^4\text{cm}^{-1}$, $10 \times 10^4\text{cm}^{-1}$ 时, Δt 分别为 14ps , 12ps , 11ps 。随着吸收系数的增大, Δt 变小。这很容易理解, 吸收系数越大, 吸收深度越浅, 表面的载流子浓度也就越高, 使表面复合率增大, 因而 Δt 变小。从上面的数据中可知, 吸收系数对 Δt 的影响较大。

(4) 体复合系数对光电导开关响应时间的影响 体复合系数 r 为 1.0×10^7 , 1.0×10^8 , 1.0×10^9 , $1.0 \times 10^{10}\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 计算得 Δt 分别为 3ps , 5ps , 11ps , 14ps 。体复合系数对开关的响应时间影响较大。在载流子的浓度不是很高时, 载流子的寿命主要由 r 来决定。 r 越大, 载流子的寿命就越短, 复合率也就越大, Δt 就越小。

(5) 激光脉冲宽度对光电导开关响应时间的影响 在激光脉冲能量不变的条件下, FWHM 为 10ps , 20ps , 30ps 时, 计算得 Δt 分别为 7ps , 12ps , 17ps 。随着激光脉冲宽

度的增加, 开关的响应时间也增加。这说明要获得很快的开关响应就必须采用很短的光脉冲来触发。在 FWHM 为 50ps 时, 计算得 $\Delta t = 27\text{ps}$ 。如果光脉冲的宽度再加宽, 就更不能够说“光电导开关响应与光脉冲在皮秒范围内准确同步了”。

3. 小结

本文通过计算机数值分析的方法, 分析了影响光电导开关响应时间的几个因素。结果表明, 要想获得很快的开关响应, 必须要用很短的激光脉冲来触发, 同时开关材料的光生载流子的寿命也要很短。

参 考 文 献

- [1] W. B. Scott, *Aviation Week & Space Technology*, **131**(1989)23, 38—41.
- [2] G. Arjavalingam, Y. Pastol, J. Malbout, G. V. Kopcsay, *IEEE Trans. on MTT*, **MTT-38**(1990)5, 615—621.
- [3] Chi H Lee, *IEEE Trans. on MTT*, **MTT-38**(1990)5, 596—607.
- [4] Chi H. Lee, ED. *Picosecond Optoelectronic Devices*, New York: Academic, (1984), p.127.

THE THEORETICAL CALCULATIONS OF RESPONSE TIME OF PHOTOCONDUCTIVE SWITCH UNDER EXCITATION OF PICOSECOND LASER PULSES

Li Xueqing Guo Kaizhou Chen Zenggui

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract The influence of laser pulse energy, laser pulse width, switch material absorption coefficient, surface recombination, bulk recombination and Auger recombination upon the response time of photoconductive switch has been analyzed by using the computer numerical approach. Although the calculation shows that the response of photoconductive switch is very fast, there exists a short time lag.

Key words Photoconductive switch; Response time; Time lag; Absorption coefficient; Carrier recombination; Laser pulse