

光导开关中的感生电流与传导电流^{*}

屈光辉 施 卫[†]

(西安理工大学物理系, 西安 710058)

(2006 年 3 月 20 日收到, 2006 年 4 月 26 日收到修改稿)

利用数值方法对线性条件下横向光电导开关的感生电流和传导电流进行了计算和比较. 结果表明在特定的实验条件下, 感生电流才会对输出电脉冲产生较大的影响. 分析了超快光电导开关在不同实验条件下传导电流与位移电流对输出电脉冲的影响. 根据该结论, 给出非线性模式下, 光电导开关电脉冲超快上升沿小于载流子以饱和速度在电极间渡越所需时间的现象.

关键词: 光电导开关, 传导电流, 位移电流

PACC: 7220H

1. 引 言

超快光电导开关具有承载功率大, 无触发晃动, 开关速度快, 寄生电容小, 重复频率高等优点. 在超高速电子学、大功率电脉冲产生、THz 技术^[1-5]、精确同步控制等领域具有广阔的应用前景^[6-9]. 光电导开关产生超快电脉冲的工作原理是: 利用超短激光脉冲照射光电导开关, 在芯片内产生光生载流子, 使开关导通, 光脉冲停止后, 载流子迅速消失使开关关断. 当偏置电场和触发光脉冲能量都大于一定的阈值时, 在 GaAs, InP 材料制作的光电导开关中会出现非线性工作模式. 在非线性模式下, 光生载流子能够在输运过程中出现倍增机理, 从而使光脉冲停止后开关仍能在一段时间保持导通状态; 电脉冲上升时间远小于载流子以饱和和漂移速度在电极间渡越所需的时间. 这些现象至今没有完美的理论模型来解释^[10, 11].

超快光电导开关常见的结构有横向结构和纵向结构. 横向结构由于结构简单, 易触发而被广泛使用. 芯片材料常选用具有高电子迁移率的半绝缘 GaAs 材料, 其迁移率 $\mu \geq 5000 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 击穿场强可达 $250 \text{kV}/\text{cm}$. 然而开关电极间隙在无表面绝缘保护的情况下, 闪络电场强度仅为 $10 \text{kV}/\text{cm}$. 为了提高光电导开关的耐压强度, 可以采用 SF₆ 气体封装(充气

压在 $0.17\text{--}0.34 \text{MPa}$ 时表面闪络电场 $20\text{--}30 \text{kV}/\text{cm}$) 纯水、绝缘油液体封装(表面闪络电场可达 $143 \text{kV}/\text{cm}$) 或 Si₃N₄ 固体封装(表面闪络电场 $35 \text{kV}/\text{cm}$) 来提高耐压强度^[12].

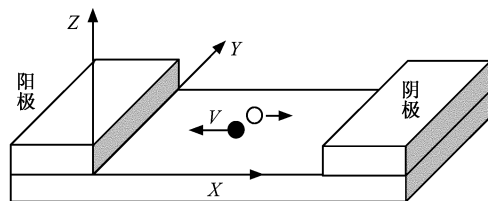


图 1 横向光电导开关结构示意图

光电导开关产生超快电脉冲可以看作是阳极电压在开关导通的瞬间向负载传输而形成的. 触发光照射开关, 产生的光生载流子在偏置电场的作用下向电极漂移. 以一定速度向电极漂移的光生载流子能在电极上引起感生电流, 光生载流子被电极吸收后, 直接形成传导电流. 无论在开关瞬态特性分析, 还是高性能开关设计, 对两者在光电导开关输出电脉冲中所占比例的研究, 都具有重要意义.

2. 载流子输运过程中感生电流的估算

横向光电导开关的结构如图 1 所示, 其测试电路由微带线和宽带同轴传输线组成. 在电路对开关

^{*} 国家自然科学基金(批准号 50477011, 10390160, 10376025)和国家重大基础研究前期专项基金(批准号 2004CCA04500)资助的课题.

[†] E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn

输出电脉冲无色散、反射条件下,载流子的输运过程决定输出电脉冲波形.激光照射光电导体,所产生的光生载流子在偏置电场的作用下分别向两电极漂移,并很快达到稳定漂移速度.在光生载流子被电极吸收以前,相当于电容器介质中的运动电荷,只能通过电极表面上感应出感应电荷的方式向外电路输出电流信号.在光电导体内部,由于载流子的运动而产生了随时间变化的电场.根据位移电流的定义^[13]

$$J_{\epsilon} = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1)$$

可知,空间中存在由运动电荷产生的位移电流.

为了计算电极垂直面上感生电荷密度变化在电极内引起的传导电流,在电极分界面两侧做平行于电极的正方形微元 $\Delta S_1, \Delta S_2$ (如图 2 所示),并以 $\Delta S_1, \Delta S_2$ 为底做闭合立方体,立方体的高度 h 趋于 0. 因为 $\Delta S_1, \Delta S_2$ 极小,所以传导电流密度和位移电流密度可认为均匀,而且可以忽略从立方体侧面流出的电流密度.根据全电流连续性方程

$$\oint_{\Delta S} \left(J_{\sigma} + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot ds = 0, \quad (2)$$

在所取的封闭面积微元上,忽略侧面流出的电流,分别在分界面内侧微元 ΔS_1 和外侧 ΔS_2 展开(2)式得

$$\int_{\Delta S_1} \left(J_{\sigma} + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot ds + \int_{\Delta S_2} \left(J_{\sigma} + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot ds = 0. \quad (3)$$

由于在金属电极内侧 ΔS_1 ,

$$J_{\epsilon} = \frac{\partial D}{\partial t} = 0, \quad (4)$$

在金属电极外侧 ΔS_2 ,

$$J_{\sigma} = 0. \quad (5)$$

将(4)(5)式代入(3)式,并考虑 $\Delta S_1, \Delta S_2$ 微元上 J_{σ} 和 J_{ϵ} 均匀得

$$J_{\sigma} - J_{\epsilon} = 0. \quad (6)$$

由(6)式可知:在电极表面,电荷运动产生的位移电流与感生电荷密度变化在金属电极内部引起的传导电流处处相等.

设光电导开关电极宽度为 3mm,电极厚度为 0.5mm,电极间隙为 3mm.偏置电场为 2000V/cm.利用时域有限分析法对初始位置在芯片中央,速度为饱和和漂移速度 1×10^5 m/s 的单电子在阳极表面上形成的位移感应进行了计算,并根据(6)式得到电极内形成的瞬态感生电流.图 3(a)所示为阳极瞬态感生电流密度法向分量分布图,横轴为电极宽度(每单位 0.01mm),纵轴为电极厚度方向(每单位 0.01mm).

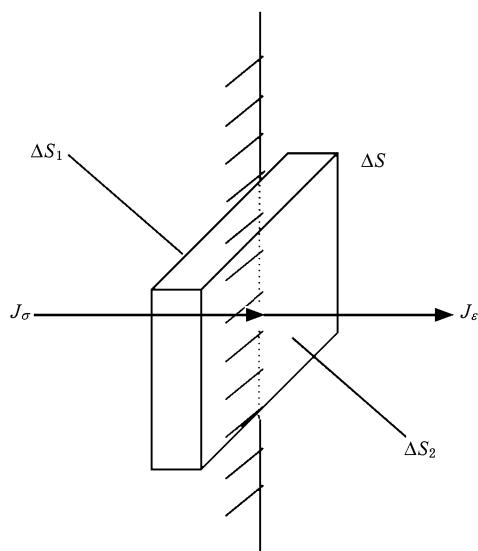


图 2 电极表面取微闭合面元

黑色区域瞬态感生电流密度法向分量为 7×10^{-7} A/m²,其他区域电流密度随颜色递减.图 3(b)为瞬态感生电流密度沿电极表面 Z 方向分量分布图.图 3(c)为电极表面瞬态感生电流密度沿电极表面 Y 方向分量分布图.对瞬态感生电流法向分量在阳极表面积分得到单电子瞬态感生电流 I_g .

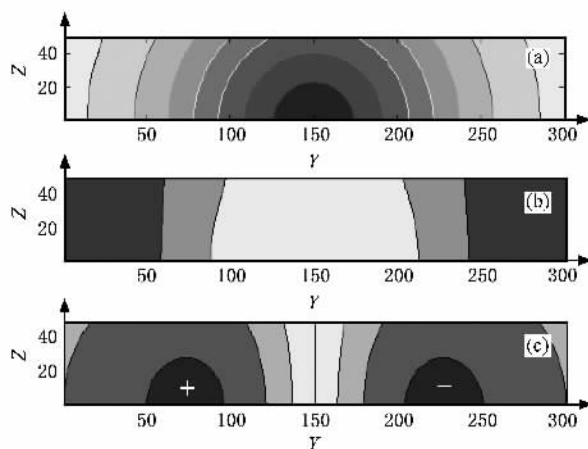


图 3 阳极感生电流密度分布图 (a)电极表面法向感生电流分布 (b)电极表面厚度方向感生电流分布 (c)电极表面宽度方向感生电流分布

进一步计算了载流子位置对感生电流的影响.图 4 所示为电子位于 X 轴方向不同位置时,电极法向感生电流的变化关系曲线.原点设在芯片中央, $x = 1.5$ mm 处为光导开关阴极.

设触发光单脉冲能量为 1μJ,波长为 800nm,量子效率为 1,光斑直径为 1mm,则光生电子数为

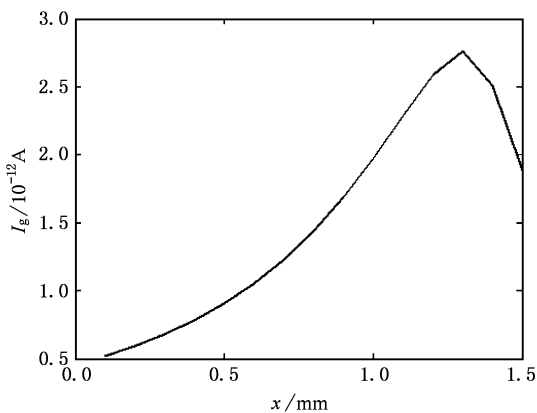


图 4 感生电流随电子位移变化曲线

$$N_e = \frac{E\lambda}{hc}, \quad (7)$$

h 为普朗克常数, c 为光速, E 为入射光单脉冲能量, λ 为激光波长. 计算得 $N_e = 4.02 \times 10^{12}$. 设光脉冲光强在空间和时间域均为高斯分布, 载流子寿命为 10 ns, 计算得到电极上产生的瞬态感生电流曲线 (图 5). 值得说明的是电极上的瞬态感生电流不等于开关的输出电流.

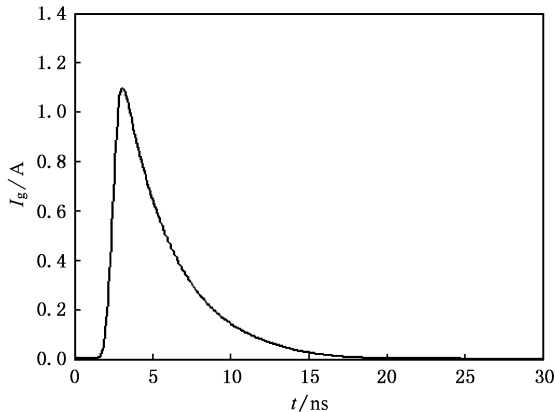


图 5 飘移电子在阳极引起的瞬态感生电流

3. 阳极吸收电子引起的瞬态电子电流

光电导开关的输出电流指的是负载上的脉冲电压与负载阻抗的比值, 是阳极电压在向负载方向传输的结果. 阳极吸收电子后, 在阳极形成负电压脉冲向电源传播, 同时在阴极感应出正的电压脉冲, 向负载传播. 在与图 5 模拟计算参数完全相同的条件下, 计算得到的阳极吸收电子引起的瞬态电流 (图 6) (计算过程没有考虑外电路对电极吸收载流子速率的影响).

将阳极吸收电子引起的瞬态传导电流与电子在飘移过程中产生的感生电流相比较, 两者幅值之比接近 10^4 , 即在此实验参数下感生电流可以忽略不计, 传导电流占主导地位. 进一步的计算表明, 当模拟参数中载流子寿命线性从 10 ns 减小到 1 ns 时, 载流子到达阳极时的浓度随寿命的缩短而迅速降低, 瞬态传导电流峰值从 2×10^4 A 减小到 0. 感生电流峰值仅降为 0.4 A.

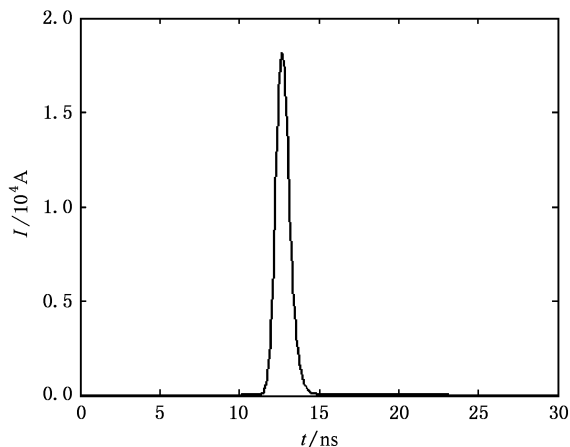


图 6 阳极吸收电子引起的瞬态电流

传导电流依赖载流子寿命, 但在数值上远大于感生电流. 仅在触发光斑不接触电极, 载流子寿命较短, 载流子在向电极飘移的过程中已复合殆尽的情况下, 感生电流才占主导地位. 感生电流与传导电流相比具有速度快, 延迟时间短的特点. 加大光电导开关电极厚度, 使用短寿命芯片材料, 可以利用感生电流产生超短电脉冲.

4. 结 论

光生载流子在芯片内的输运过程决定光电导开关的输出电脉冲. 感生电流由载流子飘移过程中在电极上产生感应电荷密度变化造成, 传导电流则由电极吸收载流子形成. 感生电流和传导电流在不同条件下对光电导开关的输出电脉冲有不同的贡献. 本文利用数值方法, 对电极上产生的感生电流和传导电流进行了计算和比较, 认为仅在触发光斑不接触电极, 载流子在飘移过程中已复合殆尽的情况下, 感生电流才对光电导开关的输出电脉冲有显著的影响, 具有更短的脉冲宽度和光电延迟时间, 但光电导开关的电压传输效率较低.

感生电流所产生的瞬态电流具有更快的上升速

度和较短的延迟时间,在产生皮秒、亚皮秒超短电脉冲过程中起决定性作用。

根据以上结论可知:光电导开关产生大功率超快电脉冲实验中,电极上的瞬态电流取决于对载流子的吸收速度,与载流子在芯片中的飘移速度没有直接关系。

在半绝缘 GaAs 光电导开关的非线性工作模式下,电脉冲上升时间明显小于载流子以饱和速度在电极之间飘移所需的渡越时间是非线性模式典型现

象之一^[14]。根据本文结论可以对非线性模式下电脉冲具有超快上升沿的现象解释为:1)非线性现象中电脉冲的超快上升时间与载流子飘移速度没有直接关系。2)光电导开关非线性模式下的光激发瞬现象导致电脉冲的超快上升沿:一般载流子飘移过程中,载流子的扩散作用使其空间分布表现为近似正态分布,当出现瞬现象时,电子在畴头部浓度高度积累,改变了电子的空间浓度分布,从而导致了电脉冲的超快上升沿。

-
- [1] Siegel P H 2002 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **50** 910
- [2] Cao J C, Lei X L, Li A Z, Liu H C 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2524
- [3] Cao J C, Lei X L 2003 *Phys. Rev. B* **67** 085309
- [4] Cao J C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 237401
- [5] Zhang T Y, Cao J C 2004 *Chinese Journal of Rare Metals* **28** 588 (in Chinese) [张同意、曹俊成 2004 稀有金属 **28** 588]
- [6] Shi W, Zhao W, Zhang X B, Li E L 2002 *Acta. Phys. Sin.* **51** 867 (in Chinese) [施卫、赵卫、张显斌、李恩玲 2002 物理学报 **51** 867]
- [7] Zheng G L, She W L 2005 *Acta. Phys. Sin.* **55** 1061 (in Chinese) [郑国梁、余卫龙 2005 物理学报 **55** 1061]
- [8] Ferguson B, Zhang X C 2002 *Nature Materials* **1** 25
- [9] Huang Y N, Ren G G 2002 *Journal of Microwaves* **18** 90 (in Chinese) [黄裕年、任国光 2002 微波学报 **18** 90]
- [10] Shi W 2001 *Chinese Journal of Semiconductors* **22** 1481
- [11] Shi W, Dai H Y, Sun X W 2003 *Chinese Optic Letter* **1** 553
- [12] Shi W, Liang Zh X, Feng J, Xu Ch X 1998 *High Voltage Engineering* **24** 12
- [13] Jiao Q X 2004 *Electromagnetic Field And Electromagnetic Wave* (Beijing: Science press) [焦其祥 2004 电磁场与电磁波(北京:科学出版社)]
- [14] Zhang T Y, Shi S X, Gong R X, Sun Y L 2002 *Acta Optic Sinica* **22** 327 (in Chinese) [张同意、石顺祥、龚仁喜、孙艳玲 2002 光学学报 **22** 327]

Inductive current and conductive current in photoconductor switches^{*}

Qu Guang-Hui Shi Wei[†]

(*Department of Physics , Xi 'an University of Technology , Xi 'an 710058 , China*)

(Received 20 March 2006 ; revised manuscript received 26 April 2006)

Abstract

Electric pulse of photoconductive switches is determined by transmission character of photo-generated carriers. In the course of transmission , inductive current on the electrodes is formed by photo-generated carriers with high drift speed. Conductive current is formed only after the carriers are absorbed by electrodes. Inductive current and conductive current are calculated by numerical method in this paper. The result shows that inductive current cannot play a main part in the photoconductive switches ' output pulse unless under abnormal test conditions. And explanation of ultra-fast rise time of out put pulse faster than the time of carriers to pass between two electrodes with saturated drift speed is given.

Keywords : photoconductive switches , conductive current , displacement current

PACC : 7220H

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 50477011 ,10390160 ,10376025) and the Prophase Special Research Item of the National Important Foundational Research Project (Grant No. 2004CCA04500).

[†] E-mail :swshi@mail.xaut.edu.cn