

光激发单极畴与耿氏偶极畴的物理机制比较*

王馨梅 施 卫[†] 田立强 侯 磊

(西安理工大学, 西安 710048)

摘要: 对比了半绝缘多能谷光电导开关中光激发单极畴和耿氏器件中偶极畴的物理机制. 从产生机理、电场分布、电子浓度、生长和演变过程等多角度阐述光激发单极畴的特性. 与偶极畴显著不同的是, 光激发单极畴内仅有光生电子积累层, 没有正离子层; 光激发单极畴与光生空穴之间产生了一个与外加电场反向的电场, 使畴前电场增强, 畴头部电子浓度最高; 光激发单极畴生长过程可以一直持续下去, 终因电子碰撞电离演变为发光畴, 如果碰撞电离达到雪崩强度, 将演变为雪崩发光畴. 最后, 本文用光激发单极畴模型解释了光电导开关非线性工作模式的超快上升沿、发光电流丝、电流锁定现象等重要实验现象.

关键词: 光激发单极畴; 偶极畴; 耿氏效应; 光电半导体开关; 碰撞电离

PACC: 7220H; 7240; 7220J

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)10-1980-04

1 引言

1963年, Gunn发现在n型GaAs两端电极上加以电压, 当半导体内电场超过 3.2kV/cm 时, 半导体内的电流便以很高的频率振荡, 这个效应被称为耿氏效应, 这种n型器件被称为耿氏器件, 器件内电荷聚集所形成的畴称为耿氏畴. 耿氏效应的本质是发生了能谷间电子转移, 使得电子漂移速度与电场的关系明显偏离了欧姆定律, 速度-电场特性曲线出现微分负阻区, 因此耿氏效应也称为转移电子效应、微分负阻效应、体效应等. 具有转移电子效应的半导体材料(GaAs, InP, GaN, CdTe, ZnSe及一些三元合金等)必须满足以下3个条件^[1]: (1)主能谷的电子有效质量应远小于次能谷; (2)主能谷和次能谷之间的能量差应大 kT , 以保证处于主能谷的电子不能因热激发而进入次能谷, 但在适当强的电场作用下却可以跃入次能谷; (3)为避免电子在谷间转移前就发生本征碰撞电离, 禁带宽度必须大于能谷和次能谷之间的能量差.

超快光电半导体开关器件是超快脉冲激光器与半绝缘光电半导体相结合形成的新型器件, 在超高速电子学、脉冲功率技术、THz技术等领域具有广阔的应用前景^[2~4]. 光电半导体开关有两种工作模式, 一种是线性模式, 开关的重复工作频率高且使用寿命很长; 另一种是非线性模式, 即在满足一定的光能、电场阈值时, 输出电脉冲出现明显的锁定现象^[5]. 2001年Shi^[5]提出, 当半绝缘GaAs, InP等光电半导体开关的偏置电场超过耿氏阈值, 且局部有高浓度的光生电子时, 必然会发生转移电子效应, 生成“光发电荷畴”, 并指出这种畴的生长可引发雪崩电离致使开关进入非线性工作模式. 本

文在前述工作基础上, 从产生机理、电场分布、畴内电子浓度分布、畴的生长过程等多角度对比分析了光激发畴与耿氏畴的区别, 并详细描述了光激发畴演化为发光畴, 直至雪崩的物理过程.

2 产生机理

在耿氏器件中, 非平衡载流子源自阴极向n型材料电注入电子. 由于半导体局部掺杂不均匀, 形成局部的高阻区, 其电场强度高于其他区域, 且高于负微分电阻区下限时, 高阻区面向阳极的一侧, 区外电子的平均漂移速度比区内大, 因而形成电子耗尽层(即电离施主层); 在高阻区面向阴极的一侧, 也是区外电子的平均漂移速度比区内大, 因而形成电子积累层. 这种由正空间电荷层和负空间电荷层构成的畴, 被称为“耿氏偶极畴”.

用波长合适的单次激光脉冲照射半绝缘的不等价多能谷半导体材料, 由于内光电效应, 光注入会产生光生电子-空穴对. 激光脉冲功率较大时, 光生电子-空穴对局部浓度可高达 10^{20}cm^{-3} 以上. 电子、空穴在电场作用下分别向两极运动, 如果外加电场足够高, 光生电子也会因为能谷间转移而出现负微分迁移率, 可形成一个或多个畴, 由于是非故意掺杂的半绝缘材料, 所以不会形成电离施主层, 畴内仅光生电子这一种空间电荷, 故称为“光激发单极畴”.

3 电场分布

由泊松方程知, 电荷的空间分布决定了电场的空间分布. 假设器件材料是均匀的, 则非平衡载流子的空间

* 国家重点基础研究发展计划(2007CB310406)和国家自然科学基金(50477011)资助项目

[†] 通信作者. Email: shiwei@xaut.edu.cn

2008-04-30 收到, 2008-05-26 定稿

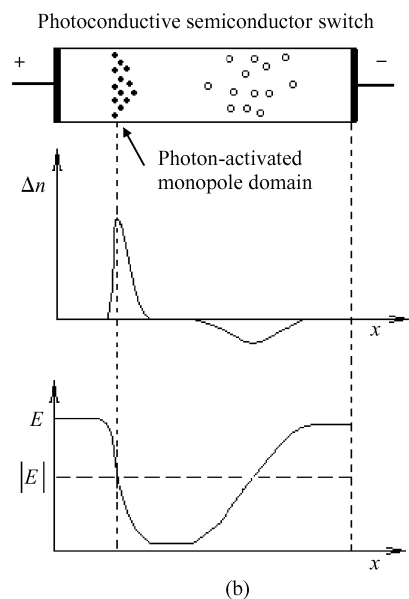
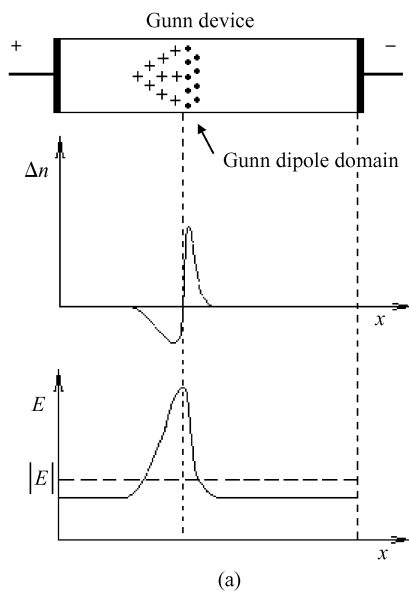


图 1 畴内外电场分布示意图 (a)耿氏偶极畴;(b)光激发单极畴
Fig.1 Schematic diagram of electric field distribution inside and outside domain (a) Gunn dipole domain; (b) Photo-activated monopole domain

分布决定了电场的空间分布. 为便于描述, 设非平衡电子浓度为 $\Delta n(x, t)$, 电场为 $E(x, t)$, 平均电场为 $|E|$.

对于耿氏器件中产生的耿氏偶极畴, 非平衡载流子来自电注入, 空间电荷和电场在某一时刻的分布如图 1(a)所示. 偶极畴内正负电荷偶极层产生一个与外加电场同方向的电场, 使畴内电场增强, 相应的畴外电场随之降低, 畴的正耗尽层和负积累层的界面对应畴电场峰值.

对于半绝缘光电半导体开关中产生的光激发单极畴, 非平衡载流子来自光注入, 空间电荷和电场在某一时刻的分布如图 1(b)所示. 光激发单极畴与光生空穴之间产生一个与外加电场反方向的电场, 具有电场屏蔽效果, 因此使畴前电场增强. 畴内电子浓度最高处对应

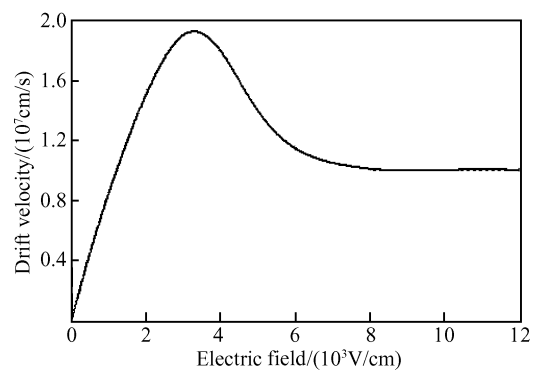


图 2 GaAs 速场特性^[1]
Fig.2 Velocity-electrical field characteristic of GaAs^[1]

电场下降最快的曲线拐点.

4 畴内电子浓度

对于耿氏偶极畴, 耿氏偶极畴电子的初始浓度由掺杂浓度决定, 掺杂浓度越高, 成畴效率越高. 因为耿氏器件是 n 型材料, 所谓畴的生长, 就是畴内耗尽层宽度不断加宽, 积累层中的电子数不断增长的过程. 随着畴的生长, 畴内电场增强, 畴外电场降低, 高场和低场的数值都将越出负微分电阻区. 当畴的漂移速度与畴外电子漂移速度相等, 畴就停止生长, 称为稳态, 以恒定的速度向阳极漂移.

对于光激发单极畴, 光激发单极畴的电子初始浓度由激光照射条件决定. 所谓单极畴的生长, 就是畴前高场使处于畴内头部的电子速度慢于后面的电子, 使光生电子不断向畴头部聚集, 使畴的宽度不断变短, 畴头部电子浓度不断升高. 当然, 随着畴头部电子浓度梯度越来越大, 扩散运动、库仑散射越来越强, 所以畴头部电子的积累速度会越来越慢. 特别需要指出的是, 与耿氏偶极畴不同, 光激发单极畴生长过程可以一直持续下去, 直至演变成下文所描述的发光畴为止. 我们以半绝缘 GaAs 材料为例分析, 畴向阳极漂移, 距离阳极越近, 畴前的电场强度越高. 如图 2 所示, 当畴内头部电场高于 2×10^4 V/cm 后, 因为电子能量已高到与光学波声子能量可比, 电子和晶格散射发射光学声子, 于是载流子从电场获得的能量大部分传递给晶格, 畴内头部电子达到饱和和漂移速度 1×10^7 cm/s; 又因为畴头电场强度最高, 沿 x 方向单调递减, 所以畴中间的电场仍处在负微分电阻区内, 该处电子速度仍高于饱和漂移速度, 仍然继续向畴头部堆积, 使畴的宽度不断变短, 畴头部电子浓度不断升高. 理想的畴内电子浓度分布应趋于直角三角形形状. 但是 GaAs 的电子浓度高于 1×10^{17} cm⁻³ 后, 扩散和库仑散射不可忽略; 此外, 对第一个单极畴来说, 因为非故意掺杂的半绝缘 GaAs 中 EL2 能级密度很高, 约为 $1 \times 10^{16} \sim 2 \times 10^{16}$ cm⁻³, 且电子俘获截面远远大于空穴俘获截面, 是高效的电子陷阱^[6], 所以如果没有额外的均匀光照射使电子陷阱饱和, 还应考虑畴头部因填充 EL2 能级造成的电子损耗.

5 单极畴向发光畴的演化

对于耿氏偶极畴,外加偏置电压恒定时,偶极畴漂移约 $1\mu\text{m}$ 量级^[1],就达到稳态,偶极畴内外电场强度不再变化.畴以一个恒定的速度向阳极漂移,到达阳极后,偶极畴区消失,体内电场又恢复到平均值,然后形成新的偶极畴,周而复始,形成耿氏振荡.所以当外加偏置电压恒定时,稳态偶极畴内电场达不到雪崩击穿场强,不会发生雪崩现象(除非因为电流热效应引起热击穿).

对于光激发单极畴,向阳极漂移距阳极越近则畴前电场越强,且单极畴头部的电子密度越高,因此距阳极越近则畴头部电子碰撞电离越剧烈.碰撞电离生成的空穴处在高电子浓度的畴内,与电子复合的几率很大,复合后将向四周随机发射光子,所以沿着畴的漂移运动轨迹形成了发光电流丝,此时的畴已演变为“发光畴”^[5].如果是直接带隙半导体,以 GaAs 材料为例,这些光子大部分会在微米量级被半导体材料再次吸收激发出新的电子-空穴对,相当于这些光子参与了载流子传输过程.由以上分析知,发光畴向各个方向随机发射光子且光子参与载流子传输过程,因此等效为发光畴体积快速膨胀.如果膨胀趋势与电子积累趋势达到动态平衡,则发光畴停止生长;如果膨胀趋势大于电子积累趋势,则发光畴趋于自行解体(湮没);如果膨胀趋势小于电子积累趋势,则发光畴碰撞电离达到雪崩倍增强度,我们称之为“雪崩发光畴”.参考“耿氏偶极畴淬灭模式”^[1]知,在雪崩区迅速向两极扩展过程中,因为电流密度很高,所以在雪崩发光畴尚未湮没或被阳极吸收时,就可能已经有另外的一个或多个畴成核,这些畴互相竞争,因此这种状态将很不稳定且输出电流噪声大.

我们用光激发单极畴(及其演变的发光畴、雪崩发光畴)模型,能够很好地解释非线性 GaAs 和 InP 光电导开关的重要实验现象.具体实验现象及理论解释如下:

(1)由实验知,在 GaAs 光电导开关电极之间有一条或多条红外发光的丝状电流通道的,其光谱为 $875 \pm 10\text{nm}$ ^[7],发光电流丝的头部传播速度大于 $5 \times 10^8\text{cm/s}$ ^[7,8].因为 GaAs 直接带隙复合产生的光子波长是 $875 \pm 10\text{nm}$,所以我们认为,发光电流丝就是发光畴的漂移运动轨迹.因为发光畴随机发射的光子(必有一半光子朝向阳极方向),可被半导体再次吸收产生光子-空穴对,相当于间接参与了载流子传输过程,又因为光子在 GaAs 晶体中的运动速度($\sim 0.75 \times 10^{10}\text{cm/s}$)远远高于电子的饱和漂移速度($\sim 1 \times 10^7\text{cm/s}$),所以向前发射的光子极大地加快了畴漂移速度,使得发光电流丝的头部传播速度比电子饱和漂移速度快 50 倍以上.

(2)由实验知,非线性模式所需的触发光能比线性模式低 3 到 5 个数量级^[8],使激光二极管阵列代替庞大昂贵的功率激光器成为可能.我们认为,开关在线性工作模式中,1 个人射光子最多产生 1 个电子-空穴对;而在非线性工作模式中,因为雪崩发光畴中的雪崩倍增效应,相当于 1 个人射光子激发多倍电子-空穴对参与导

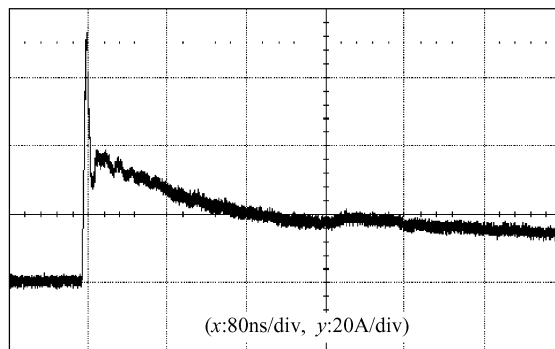


图 3 GaAs 光电导开关在非线性工作模式下的电流波形

Fig.3 Current waveform of GaAs photoconductive semiconductor switch working in nonlinear mode

电过程(即高增益),所以非线性模式所需的触发光能远小于线性模式.

(3)由实验知,输出电脉冲上升时间甚至快于触发光脉冲的超快上升沿,且芯片、电极损伤通常先发生在阳极^[6,7].我们认为,第一个发光畴漂移到阳极被吸收时,由于畴头部电子浓度很高,在电路中产生的传导电流上升率很大,所以非线性 GaAs 光电导实验中经常观察到超快上升沿现象.如果阳极的欧姆接触不良,则畴头高浓度电子在阳极附近累积造成芯片损伤,并引起阳极的退化.

(4)由实验知,GaAs:EL2 光导开关的非线性工作阈值电场为 4kV/cm 左右,GaAs:Cr 开关阈值电场接近 10kV/cm ,均高于 GaAs 耿氏阈值 3.2kV/cm .我们认为,电场强度达到耿氏阈值时,仅能在光电导开关中产生单极畴.只有在电场强度大于耿氏阈值时,单极畴才有可能演变为雪崩发光畴,使开关工作在典型的非线性模式,所以半绝缘 GaAs 光电导开关的非线性电场阈值必然要比耿氏阈值高.

(5)由实验知,当触发光脉冲消失后,开关仍维持高导通,称为锁定(lock-on)状态,持续时间一般为微秒量级以上,如图 3 所示.我们认为,是雪崩发光畴促使开关进入锁定状态.

(6)由实验知,触发光能越大,非线性的电场阈值越低;在相同的偏置电场强度下,光脉冲点触发比均匀照射触发的光能阈值小^[8].我们认为,GaAs 开关的非线性工作模式对入射光能阈值需求的实质是对光注入载流子浓度的需求,所以入射光子浓度越高,产生雪崩发光畴所需的非线性电场阈值越低;点触发与等量的均匀照射触发相比,前者的成畴效率更高.

综上,鉴于非线性模式下半绝缘光电导开关可以用弱光触发,且输出电脉冲的上升沿快于线性模式(即频带宽于线性模式),且存在载流子雪崩倍增现象.因此,如果能有效抑制锁定现象,则用非线性光电导开关产生 THz 的诸多性能(功率等)要优于现有的光电导偶极天线.

6 结论

耿氏偶极畴产生在具有转移电子效应的 n 型半导

体材料中,是电子积累层和电离施主层组成的空间电荷偶极层,畴内非平衡电子源自电注入.耿氏偶极畴产生一个与外加电场同方向的电场,使畴内电场增强,畴外电场随之降低.光激发单极畴产生在具有转移电子效应的半绝缘光电导材料中,非平衡电子源自光注入,由光生电子因为负微分迁移率积累而构成单极畴.与耿氏偶极畴明显不同的是,光激发单极畴与光生空穴之间产生一个与外加电场反方向的电场,因此使畴前电场增强,畴头部电子浓度最高.光激发单极畴生长过程可以一直持续下去,可因电子碰撞电离而演变为发光畴.当电子碰撞电离强度达到雪崩状态时,演变为雪崩发光畴.单极畴(及其演变的发光畴、雪崩发光畴)模型能够较好地解释半绝缘 GaAs 等光电导开关的非线性模式下的重要实验现象.

参考文献

[1] Bosch B G, Engelmann R W H. Gunn-effect electronic. London:

Pitman Publishing, 1975

- [2] Islam N E, Schamiloglu E, Fleddermann C B. Characterization of semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch for ultrawide band high power microwave applications. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(14):1988
- [3] Shi Wei, Zhang Xianbin, Li Qi, et al. High gain lateral semi-insulating GaAs photoconductive switch triggered by 1064nm laser pulses. *Chin Phys Lett*, 2002, 19(3):351
- [4] Shi Wei, Xu Jingzhou, Zhang X C. Terahertz generation from Si₃N₄ covered photoconductive dipole antenna. *Chinese Optics Letters* 2003, 1(5):308
- [5] Shi Wei. Optically activated charge domain model for high-gain GaAs photoconductive switches. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(12):1481
- [6] Bourgoin J C, Neffati T. Detection of the metastable state of the EL2 defect in GaAs. *J Appl Phys*, 1997, 82(8):4124
- [7] Adams J C, Falk R A, Capps C D, et al. Characterization of current filamentation in GaAs photoconductive switches. *Proc SPIE*, 1993, 1873:10
- [8] Loubriel G, Zutavern F, O'Malley M, et al. High-gain GaAs photoconductive semiconductor switches; measurement of filament velocity and reduced trigger energy. *Proc SPIE*, 1995:21

Comparisons of Photon-Activated Monopole Domain and Gunn Dipole Domain*

Wang Xinmei, Shi Wei[†], Tian Liqiang, and Hou Lei

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The photon-activated monopole domain in a semi-insulating multi-valley photoconductive semiconductor switch and the dipole domain in a Gunn device are compared. The generation mechanism, electric field distribution, electron concentration distribution, growth and evolution of the photon-activated monopole domain are discussed. Compared with the Gunn dipole domain, there is only an accumulation layer of photon-activated electrons in the photon-activated monopole domain, but no layer of positive ions; Because the electric field formed by the photon-activated monopole domain and the photon-activated holes is the opposite of the external electric field, the electric field before the monopole domain is enhanced and the electron concentration at the head of the domain is higher than in other regions; a monopole domain can grow until it becomes a luminous domain because of impact ionization, and a luminous domain will evolve into an avalanche luminous domain if it reaches avalanche conditions. Finally, important experimental phenomena of the switch working in nonlinear mode, such as the ultrafast rising edge, luminous current filaments, and the lock-on state of current, are explained by the model of the photon-activated monopole domain.

Key words: photon-activated monopole domain; dipole domain; Gunn effect; photoconductive semiconductor switch; impact ionization

PACC: 7220H; 7240; 7220J

Article ID: 0253-4177(2008)10-1980-04

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2007CB310406) and the National Natural Science Foundation of China (No. 50477011)

[†] Corresponding author. Email: shiwei@xaut.edu.cn

Received 30 April 2008, revised manuscript received 26 May 2008

©2008 Chinese Institute of Electronics