

飞秒脉冲探测半导体

David H. Auston

在半导体微电子学中,小尺度的高速电子器件始终是人们关注的焦点。要发展更高速的器件,就必须详细了解皮秒(ps)和飞秒(fs)时标上半导体中电子的动力学性质,这就向实验工作者提出了挑战。利用高速电子仪器的传统方法对飞秒测量已不再有效,因为即使是最好的电子仪器也被其中半导体元件的某些物理效应所限制,而这些物理效应恰好是我们希望观察的。解决这个矛盾的办法是选择其他具有超高级时间分辨率的测量工具——短脉冲激光器。在速度方面,光学几乎超过电子学两个量级,而且用光学技术测量半导体器件及线路的电学性质还有其他一些优点,例如微扰最小,灵敏度近乎完美,不存在时间不匹配等。

新型的高精度现代光学技术已用来在更短的时间标度上揭示半导体的性质,这种时标之短是以前人们所无法相信的。本文将介绍这些

最新技术的发展,并举例说明它们如何帮助我们更深入地理解半导体非平衡现象的物理实质。

1. 短脉冲激光器

近年来,短光脉冲的产生和探测技术获得了长足进步^[1],其标志就是平衡碰撞脉冲模式锁定若丹明染料激光器(CPM)。CPM激光器是十几年前由 Charles Shank 和 Erich Ippen 首先开始研制的,经多方改进,现已成为一种重要的飞秒测量实验工具。

让我们看一下一个用于高速光测量的飞秒激光器的主要性能参数。脉冲持续时间为 30 fs,重复率为 100 MHz,平均光功率为 20 mW,波长中心在 625 nm。由于脉冲特别短,谱线就很宽,约为 15 nm。利用非线性光学技术还可把光脉冲“压缩”得更短,突出的例子是把 30 fs 的脉冲压缩到 6 fs,这仅仅相当于三个光周期

多,但是对解决光合作用机理的研究却并无实质性的进展。化学工作者则从叶绿体能光解水放出氧气这一光合作用现象出发,着眼于用半导体作催化剂去光解水产生氢、产生氧,或利用水中的氢、氧去合成某些化学物质。这些工作为解决将来的能源问题是很有意义的,但对解决光合作用机理问题则远了一点。因此,如果物理学工作者也来关心光合作用的研究,和其他学科的科学工作者相互配合,那么一定可以加快光合作用研究的进展。

- [1] R. B. Park et al., *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **22**(1971), 395.
- [2] E. Racker, *Nature*, **175**(1955), 249.
- [3] Von E. Baur und C. Neuweiler, *Hev. Chim Acta*, **10**(1927), 901.
- [4] E. Katz, in "Photosynthesis in Plants", ed. J. Frank, et al., Iowa State College Press, Ames Iowa, (1949), 287.

- [5] J. C. Goedheer, *Biochim. Biophys. Acta*, **16**(1955), 471; **51**(1961), 494.
- [6] R. A. Olson et al., *Biochim. Biophys. Acta*, **88**(1964), 318, 331.
- [7] W. Arnold et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. (USA)*, **43**(1957), 105.
- [8] W. Arnold et al., *J. Phys. Chem.*, **63**(1959), 2.
- [9] G. Tollin et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. (USA)*, **44**(1958), 1035.
- [10] J. E. Brugger et al., *Arch. Biochem. Biophys.*, **75**(1958), 465.
- [11] E. L. Rabinowitch, *Discu. Faraday Soc.*, **27**(1959), 161.
- [12] B. Rosenberg, *Discu. Faraday Soc.*, **27**(1959), 254.
- [13] S. Ichimura, *Biophys. J.*, **1**(1960), 99.
- [14] K. J. McCree, *Biochim. Biophys. Acta*, **102**(1965), 90, 96.
- [15] 西村光雄, *科学*, **35**(1965), 548.
- [16] R. Emerson et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. (USA)*, **43**(1957), 133.
- [17] 范义积, *植物学报*, **18**(1976), 71, 170.
- [18] 范义积等, *中国科学*, No. 5(1976), 504, 509.
- [19] 范义积等, *中国科学*, No. 5(1978), 575.

长(红光的一个周期约为 2 fs)。

用一短光脉冲照射半导体,当脉冲光子能量 $h\nu$ 大于半导体的禁带宽度 E_g 时,将出现一些基本的物理现象。作为例子,考虑 GaAs ($E_g = 1.45\text{eV}$) 对 2.0 eV 飞秒脉冲的吸收。由于光的激发,电子由价带跃迁到导带(图 1), GaAs 的三个价带对光吸收都有贡献。图 1 中标有 HB, LB 和 SB 的三个价带分别是重空穴带、轻空穴带和分裂带。导带除了最低的中心 Γ 谷外,在布里渊区的 L 点和 X 点还有两个伴谷,分别高出 Γ 谷 0.3 eV 和 0.5 eV。

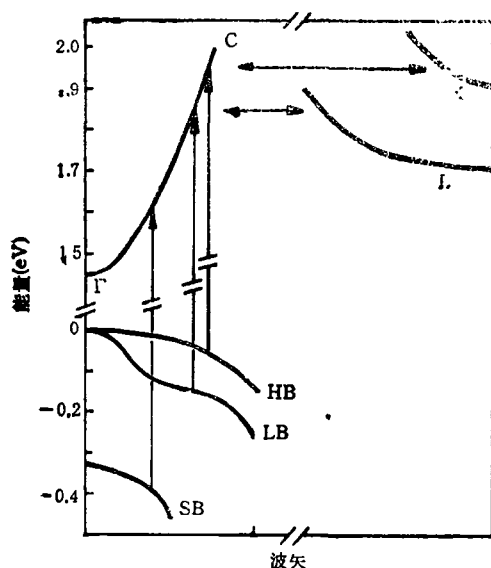


图 1 GaAs 的能带结构

高能电子和空穴一旦被激发,便将迅速地经历某些变化,最终恢复平衡。非平衡载流子的弛豫是一个很重要的问题,引起了实验工作者极大的兴趣。高能电子和空穴如何迅速地呈现玻耳兹曼能量分布? 电子从中心谷到伴谷的转移率有多大? 又如何从伴谷返回中心谷? 电导率如何随时间变化? 诸如此类的问题将是理解非平衡现象物理本质的关键。

最近,实验工作者利用短光脉冲技术研究了半导体的弛豫,通过光吸收、拉曼散射、荧光、电导率、电光及光发射等的测量,使许多问题得到了比较详细的答案。下面就概括性地介绍一些有代表性的实验及其结果。

物理

2. 饱和光吸收

饱和光吸收的时间分辨率可解释很多重要的弛豫机制。饱和的物理基础是非平衡载流子占据电子态。电子吸收一个光子后由价带垂直跃迁到导带。若光场足够强,则电子受激又返回到价带中的空态,同时释放一个和刚才被吸收的光子完全一样的光子。当激发态和基态粒子数相等时,就达到完全饱和。

半导体的饱和效应可用两个光脉冲来测量。第一个脉冲称为泵,用以感生光吸收的饱和;第二个脉冲称为探针,探测光吸收的饱和。测量透过样品的探针脉冲的吸收的原理是:若电子和空穴停留在非平衡激发态的时间足够长,探针的吸收减弱,但一旦被激发的载流子离开初始状态后,探针的吸收便恢复。改变两个脉冲之间的时间延迟,就可得到饱和的时间演变图,从而精确地测量电子离开激发态的散射率。

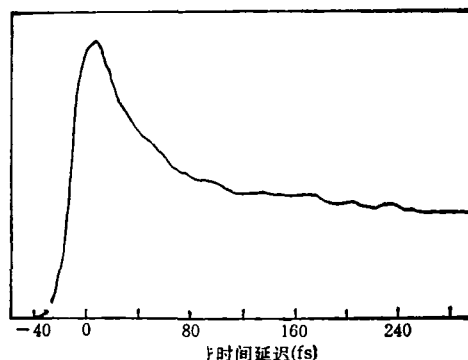


图 2 GaAs 晶体透射率随时间延迟的变化曲线 (样品厚 $0.1\ \mu\text{m}$)

Shank 等人利用光子能量为 2.0 eV 的 6 fs 光脉冲测量了 GaAs 的饱和光吸收^[2],结果如图 2 所示。他们观察到一个初始的瞬态饱和,室温下它的衰变时间常数为 33 fs。衰变可归结于电子快速转移到 X 和 L 谷的贡献。他们还在 35 K 下重复了上述实验,这时由于 GaAs 的能隙变大,只允许到 L 谷的转移,因此可以分别确定每个谷的转移率。实验结果是: L 和 X 谷的转移率分别是 80 fs 和 55 fs。

3. 亚皮秒荧光谱

Jagdeep Shah 等人发展了一种具有亚皮秒时间分辨率的测量半导体荧光光谱的技术^[3]。他们利用非线性光学和频振荡来选通荧光信号,在一个非线性光学晶体中把荧光信号和一个短光脉冲(门脉冲)混合起来,从而得到另一个脉冲信号,该脉冲频率是两个输入信号频率之和,强度则正比于两个信号强度之积。门脉冲是由一压缩同步泵浦染料激光器发出的,持续时间仅为 0.5 ps,因此改变门脉冲的延时并记录和频脉冲的强度变化,就可得到具有亚皮秒时间分辨率的荧光谱。

Shah 等人用这种技术观察了亚皮秒光脉冲激发后的 GaAs 和 InP 荧光谱的时间演变,并对谷间转移、电子温度等进行了详细的讨论。

4. 高速电信号

尽管通过光测量可推断半导体材料和器件电性质的动力学行为,而最近发展的技术^[4]却使得直接的皮秒和亚皮秒电测量也成为现实,这些技术均采用高速转换器把短光脉冲转换为短电脉冲。

最普遍的转换器是辐射损伤半导体制成的高速光导体。辐射损伤产生的高密度缺陷能快速俘获光产生的空穴并终止光电流。因此,光导体就好比是一个光激活电开关,在短光脉冲的照射下它将开启一个很短的时间。把波形待测的高速电信号加到光导体上作为偏置电压,在一个光脉冲的冲击下,光导体开启,输出一电信号,该信号正比于脉冲到达时刻偏置信号的振幅。改变光脉冲和待测电信号之间的相对时间延迟,就可得到待测信号波形的一个频闪拷贝。上述测量结果和传统的采样示波器的结果很相似。但是,现在的时间分辨率由光导开关持续开启的时间决定,将小于 1 ps。这是采样示波器所无法比拟的。

一个完整的高速电测量系统包括两个光导体,一个用以产生短电脉冲,另一个作为采样门测量器件或材料的电反应。控制两个光导体的两个光脉冲完全一样,而且两者间的相对时间延迟可精确控制。

还有一种测量高速电信号的方法,是电光

采样,它的原理和方法与下面将要介绍的外部电光探针基本相同,我们将在下一部分较详细地讨论。由于有些材料的电光效应内禀速度极快(可小于 10^{-13} s),电光采样法的时间分辨率也是相当好的。

5. 外部电光探针

传统的表面探针的速度和灵活性都有很大的局限性,且不能检测电路内部点。新型的电光探针已显示出很大的优越性,必将逐步取代传统的表面探针。

Janis Valdmanis 采用一个很小的电光晶体做成外部非接触式探针(图 3),用以测量高速集成电路^[5]。

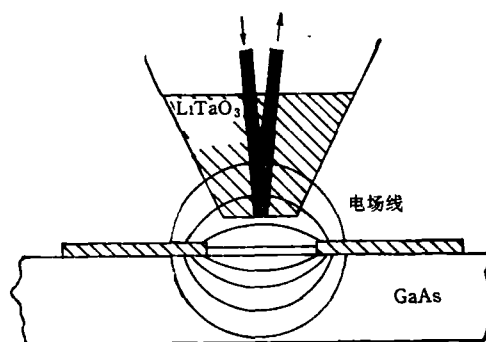


图 3 非接触式外部电光探针

当一个很小的钽酸锂晶体靠近而不接触电路的某个点时,电路上方的边缘电场会引起晶体光折射率的改变。因此,当一个皮秒(或飞秒)光脉冲从晶体顶部穿入而被底尖端反射时,被反射的光脉冲的振幅将随电场而变,由于脉冲振幅的改变正比于探针下方电路中的电场,这样,通过观察被反射的光脉冲强度的变化就可确定探针下方电路中电场的大小。由于晶体探测的是电路上方的边缘电场,这种外部电光探针可用于测量电路中任意点的电压波形。

外部电光探针现已广泛用于 GaAs 和 Si 集成电路高速波形的测量,并将逐渐成为一种多用途的测量工具。

6. 皮秒电冲击波

David Bloom 和他的学生向我们展示了一种新技术,表明了产生极短电脉冲的光辉前

景^[6]。他们设计了一个载有非线性电容器的电传输线，它包括一个位于半绝缘 GaAs 衬底上的高阻共面波导结构。这样设计的传输线中，电信号的传播速度和电压有关，也就是说，零偏置信号的传播速度比反偏置信号的传播速度小。因此，当从传输线的一端注入一振幅较大的正弦波时，从谷上升到峰的时间将大于从峰下降到谷的时间，即波形后沿将变陡。Bloom 小组从传输线的一端注入一个 10 GHz 的正弦波，输出端得到一个下降时间仅为 1.6 ps、振幅为 6 V 的电冲击波(图 4)。

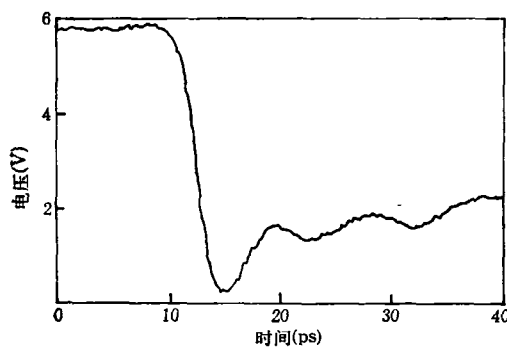


图 4 皮秒电冲击波的电压波形

由于衬底材料 GaAs 本身就是一种电光材料，所以无需任何外部电探针。直接利用一红外皮秒光脉冲在 GaAs 衬底上进行电光采样，就可精确测量传输线中电冲击波的振幅与波形。

7. 亚皮秒瞬态电导率

Martin Nuss 等人用飞秒电脉冲测量了载流子注入后 GaAs 样品电导率的时间演变^[7]。利用电光晶体钽酸锂中的电光切连科夫辐射来产生短电脉冲，如图 5(a) 所示。这种低频电脉冲由一入射光脉冲(上面标有 G 的箭头)激发，可由另一个平行的且延迟时间可变的飞秒光脉冲(下面标有 P 的箭头)来探测。由于晶体中光的群速度比辐射电脉冲的速度大，这样就形成了一锥形波。辐射电脉冲象自由波一样传播，持续时间和光脉冲差不多，大约为 300 fs 长。

利用上述短电脉冲测量 GaAs 中热载流子的瞬态电导率。如图 5(b) 所示，标有 G 的光脉

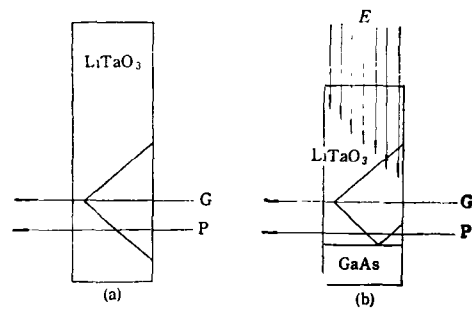


图 5

(a) LiTaO₃ 晶体中的电光切连科夫辐射；
(b) 利用短电脉冲测量 GaAs 瞬态电导率

冲激发了钽酸锂晶体中的电光切连科夫辐射，产生短电脉冲，这个短电脉冲由另一平行的标有 P 的光脉冲来探测，图中另一飞秒光脉冲(标有 E 的垂直箭头)用来向晶体中注入电子和空穴。由于载流子的注入会引起 GaAs 表面电导率的变化，从而影响它的反射率，所以当上述辐射短电脉冲被 GaAs 表面反射时，被反射的电脉冲的振幅将随 GaAs 的电导率而变。改变光注入和光探测之间的时间延迟，就可得到电导率的时间演变。实验结果表明电导率的上升时间相对来说比较慢(3—5 ps)，这说明电导率并不随载流子注入的瞬态变化而变，而是受到热电子和空穴弛豫的内动力学的限制。

8. 速度过冲

半导体微电子学器件中，电子经常和高达几十 kV/cm 的电场联系在一起。在瞬态条件下，强电场的出现将引起一种速度过冲现象：若电子突然置身于一个很强的电场中，电子的漂移速度在一段很短的时间内突然变大而超过稳态值，好像是产生了一个很短的“速度脉冲”。

Gerard Mourou 领导的一个小组观察了 GaAs 中的速度过冲现象^[8]。由于上升时间小于 1 ps 的电场的产生是很困难的，于是他们选用恒定不变的电场，而采用飞秒光脉冲向电场中注入载流子。在 10 kV/cm 的电场下，电流波形很明显地有一个峰，峰值约为稳态值的两倍，持续时间约 2 ps，但在 5 kV/cm 和 2 kV/cm 的较低电场下没有观察到速度过冲。

速度过冲与能带结构密切相关，它将是提

电磁力和弱力的统一

Paul Langacker and Alfred K. Mann

1983年标志着粒子物理发展史中特别引人瞩目的十年的结束。在从1973年开始的这十年中,有三个特别重要的,或许可以说具有历史意义的成就。它们是:

1. 理论上与实验上实现了控制所有电磁现象和弱相互作用的力的统一。

2. 认识到强相互作用粒子(核子、介子和其他强子)事实上是由称为夸克的更小的组分构成的,并发展了一种关于夸克之间作用力的初步理论。

3. 承认存在着除了质量外其它性质几乎完全相同的三代基本粒子族。每一代包括两个夸克,一个带电轻子(电子、 μ 子和 τ 子)和一个中微子。

电磁力和弱力的这种统一理论与强相互作用的初步理论一起,称为“标准模型”。在精确地描写基本粒子和它们之间的相互作用方面,这个模型取得了相当大的成功。与广义相对论引力理论结合在一起,又使它成为能够预言或至少能描写地球物理或天体物理的通常条件下物质所有性质的一种数学上自洽的理论。它的适用范围直到 10^{-16} cm,这是到目前为止最强大的粒子加速器曾经探测过的最小距离。

尽管标准模型取得了惊人的成功,把它当作物质终极理论的候选者来看待的物理学家却

高半导体电子学及光电子学器件反应速度的一个重要机制。

综上所述,既灵活又具有高精度的飞秒光电子学,将进一步揭示半导体光学和电学性质之间的关系,并为高速器件的发展铺平道路。

- [1] C. V. Shank, *Ultrashort Light Pulses*, Springer-Verlag, New York, (1988), 5.
[2] P. C. Becker et al., *Appl. Phys. Lett.*, 53(1988),

很少。原因是这个理论实在太复杂,它解释不了的东西太多。例如,它的基本常数和参量太多(在最简单的理论模型中,也有21个),其中包括基本粒子的质量和各种力的强度。虽然这些参量的数值可以从实验数据分析中得到,但是模型本身不能对它们给出预言或更深层次的解释。同样,对于质子的电荷与电子的电荷符号相反、大小精确地相等的这个事实,标准模型只能做到承认,却不能给出任何解释。

基本粒子按代来分类,特别令人迷惑不解。通常条件下的物质几乎完全由三代中最轻的第一代组成。虽然比较重的两代都是在实验室中按正规实验办法产生出来,我们却仍然没有能够理解它们究竟有什么意义,起什么作用。此外,描写夸克和强子的数学理论——量子色动力学的定量实验检验远没有完成。

一、电弱统一理论

在这十年的成就当中,实际上能够看作自洽理论的是电弱统一理论。它经过了实验很好的检验,并且可以正式写入物理教科书。它是一种相对论量子场论。对于能量范围跨越几个量级的所有已知的电磁现象和弱作用现象,它都能以直接而且自然的方式给出了漂亮的定量

2089.

- [3] J. Shah et al., *Phys. Rev. Lett.*, 59(1987), 222.
[4] D. H. Auston, *Ultrashort Light Pulses*, Springer-Verlag, New York, (1988), 183.
[5] J. A. Valdmanis, *Electron. Lett.*, 23(1987), 1308
[6] C. J. Madden et al., *Appl. Phys. Lett.*, 54(1989), 1019.
[7] M. C. Nuss et al., *Phys. Rev. Lett.*, 58(1987), 2355.
[8] K. Meyer et al., *Appl. Phys. Lett.*, 53(1988), 2254.

(陈辰嘉、高蔚根据 *Physics Today* 1990年 第2期第46—54页编译)