

砷化镓内皮秒脉冲的啁啾产生

张筑虹 范滇元

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 研究了砷化镓内光生自由载流子引起的非线性折射率所导致的脉冲啁啾行为, 并给出解释性实验结果.

关键词 砷化镓, 脉冲啁啾.

1 引 言

光脉冲的啁啾行为在脉冲整形及进一步压缩中起着重要作用. 许多介质, 诸如增益介质、饱和吸收体、镀膜反射镜、以及其它色散元件, 都对脉冲啁啾有影响. 至今为止, 虽然已有许多理论及实验报道^[1~4], 但计及半导体材料对光脉冲啁啾影响的研究工作尚未见报道.

近年来, 采用超短光脉冲探针方法研究半导体内的超快过程^[5], 以及半导体材料在激光系统中的应用^[6], 都提出了细致研究光脉冲与半导体材料间相互作用的要求. 砷化镓(GaAs)是一种很重要而且得到广泛应用的半导体, 由于它具有高的电子迁移率和大的 Drude 系数, 可以肯定地说, 光生自由载流子引起的非线性折射率将会影响到光脉冲的啁啾行为.

2 理论分析及讨论

鉴于半导体内存在许多因自由载流子态及自由载流子的光产生复杂的非线性光学过程, 本文只研究 GaAs 在强光、短脉冲($\sim 200 \text{ MW}/\mu\text{m}^2$, 如锁模光脉冲)作用下, 自由载流子主要由价带至导带的双光子过程产生的非线性过程. 在这种情况下, 自由载流子所感生的非线性折射率 Δn 占主导地位, 并可用电场 E 的四阶效应表示^[7]:

$$\Delta n = \frac{2\pi}{n_0} \chi^{(5)} E E E E = - \frac{2\pi N e^2}{n m_{e*}^* \omega^2} \cdot \frac{\omega_p^2}{\omega_p^2 - \omega^2} = K_1 N \quad (1)$$

式中: n 为 GaAs 的折射率; N 为自由载流子密度; $\omega = 2\omega_1$, ω_1 为光脉冲的中心频率; $\omega_p = E_g/\hbar$, E_g 是 GaAs 的带隙; $m_{e*}^* = m_e m_h / (m_e + m_h)$, m_e 、 m_h 分别是电子和空穴的有效质量; K_1 定义为自由载流子密度与感生折射率间的比例系数.

描述由双光子过程产生的载流子密度 N 的扩散方程为

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\beta I^2}{2\hbar\omega_1} + D\nabla^2 N \quad (2)$$

式中 β 为 GaAs 的双光子吸收系数; D 为双极扩散系数. 在此, 略去了弛豫时间在纳秒量级的电子空穴复合过程^[8].

如图 1, 选取光脉冲沿 z 轴通过 GaAs, 由于光感生自由载流子而使光脉冲获得时变的附加位相 $\phi(t)$

$$\phi(t) = -\frac{\omega_1}{c} \int_{-L/2}^{L/2} n(z, t) dz \quad (3)$$

L 是 GaAs 的厚度. 由此给出光脉冲的时间扫频和啁啾

$$\delta\omega = \frac{d\phi(t)}{dt} = -\frac{\omega_1 K_1}{c} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\partial N}{\partial t} dz; \quad C = \frac{d^2\phi(t)}{d^2t} \quad (4)$$

2.1 光脉冲沿 z 单向通过 GaAs

在这种情况下, GaAs 内的光场是非空间调制的, (2) 式中的双极扩散项可以略, 光脉冲强度由下式表示

$$I = I_0 \exp \left\{ -4 \ln 2 \frac{[t + (z/v)]^2}{\tau^2} \right\} \quad (5)$$

式中 τ 为脉宽; v 为光在 GaAs 中的传输速度. 对 GaAs 薄片, 光强可取一阶近似并代入(4)式可得

$$\delta\omega(t) = -\frac{\beta K_1 L I_0^2}{2\hbar c} I_0^2(t), \quad C(t) = \frac{8 \ln 2 \beta L I_0^2 K_1}{\hbar c \tau^2} t I_0^2(t) \quad (6)$$

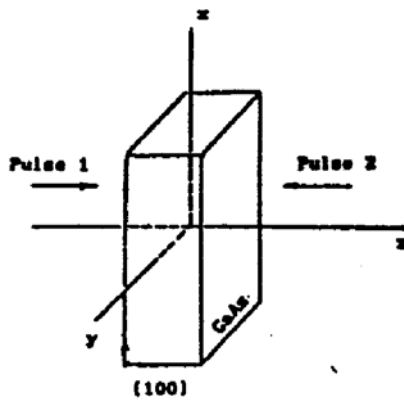


Fig. 1 Generic geometry for placing GaAs

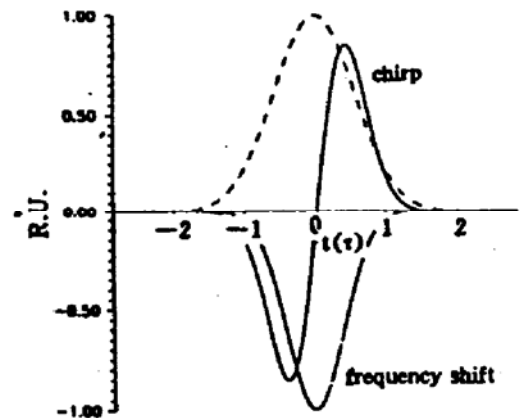


Fig. 2 Typical schematic diagram of the instantaneous frequency shift and chirp arising from the induced refractive index in GaAs. The incident pulse is Gaussian shaped (dash line)

由(6)式给出光脉冲典型扫频及啁啾曲线的物理示意图 2, 因物理量的具体大小只影响啁啾的量值, 可由具体实验给出, 本文着重讨论啁啾性质. 显然, 脉冲前部和后部具有符号相反的啁啾, 且为非线性的. 可以预期, 如用光栅对此脉冲进行色散补偿, 只能得到前沿压缩并伴有后沿展宽.

2.2 光脉冲沿 z 双向对撞通过 GaAs

在这种情况下, 光脉冲在 GaAs 内形成周期调制光场, 并将沿 z 向感生自由载流子光栅. 对波长为 $1\mu\text{m}$ 的光而言, 此光栅的光栅常数为 $0.5\mu\text{m}$, (2) 式可改变为

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\beta I^2}{2\hbar\omega} - \frac{N}{\tau_D} \quad (7)$$

式中 $\tau_D = \Lambda^2 / 4\pi^2 D$, τ_D 是为了简便描述双极扩散而引入的载流子衰减时间; Λ 为光栅常数. 此时, GaAs 内的光强可表示为

$$I = I_0 \left\{ \exp \left[-4 \ln 2 \frac{[t + (z/v)]^2}{\tau^2} \right] + \exp \left[-4 \ln 2 \frac{[t - (z/v)]^2}{\tau^2} \right] \right. \\ \left. + 2 \exp \left[-4 \ln 2 \frac{[t^2 + (z^2/v^2)]}{\tau^2} \right] \cos(2kz) \right\} \quad (8)$$

式中, k 为光波矢. 同 2.1 取光强的一阶近似代入(7)式, 可得到光感生载流子沿 z 向的瞬时分布

$$N(z, t) = \frac{2\beta I_0^2 K_2 \tau}{\hbar \omega_1} \left\{ \frac{\sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erfc} \left[2 \sqrt{2 \ln 2} \left(\frac{\tau}{16 \ln 2 \tau_D} - \frac{t}{\tau} \right) \right] \right. \\ \left. \exp \left(-\frac{t}{\tau_D} \right) (1 + \cos 2kz)^2 \right\} \\ = \frac{2\beta I_0^2 K_2 \tau}{\hbar \omega_1} N_1(t) (1 + \cos 2kz)^2 \\ K_2 = \frac{1}{2 \sqrt{2 \ln 2}} \exp \left(\frac{\tau^2}{32 \ln 2 \tau_D^2} \right) \quad (9)$$

代入(4)式, 即可给出对撞光脉冲的瞬时扫频的啁啾

$$\left. \begin{aligned} \delta\omega(t) &= -\frac{2K_1\beta I_0^2}{\hbar c} \left[I_i^2(t) - \frac{K_2\tau}{\tau_D} N_1(t) \right] \left(\frac{3L}{2} + \frac{3\sin kL}{k} + \frac{\sin 2kL}{4k} \right), \\ C(t) &= \frac{2K_1\beta I_0^2}{\hbar c} \left[\left(\frac{16 \ln 2t}{\tau^2} + \frac{1}{\tau_D} \right) I_i^2(t) - \frac{K_2\tau}{\tau_D} N_1(t) \right] \\ &\quad \left(\frac{3L}{2} + \frac{3 \sin kL}{k} + \frac{\sin 2kL}{4k} \right), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

比较(6)、(10)两式可见: 光脉冲的对撞效应通过调制光生自由载流子的空间分布, 在 GaAs 内感生折射率调制, 并由于双极扩散所引起的载流子快弛豫, 即感生折射率 Δn 的瞬时变化, 而对光脉冲的啁啾产生附加影响. 在此作者引入 B 因子来描述双极扩散对脉冲啁啾的影响, 定义 B 因子为

$$B = \tau' / \tau_D; \quad \tau' = \tau / \sqrt{8 \ln 2} \quad (11)$$

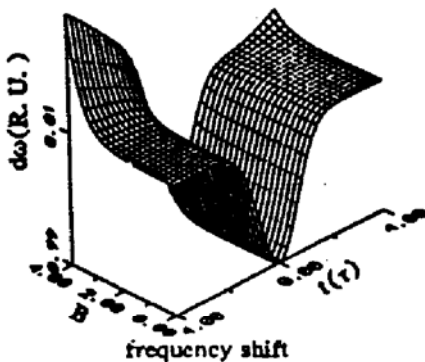


Fig. 3 3D diagram of the frequency shift arising from the induced refractive index in GaAs. The colliding effect of the propagating pulses in GaAs is taken into account

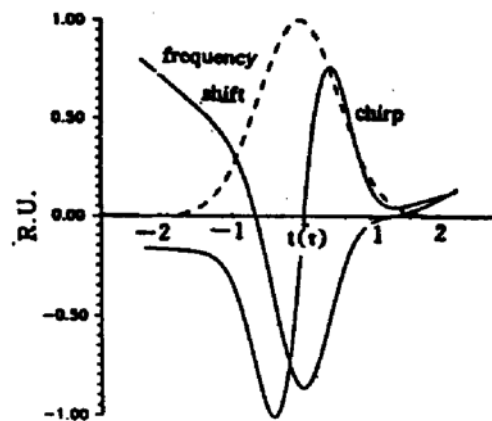


Fig. 4 Typical schematic diagram of the frequency shift and the chirp produced in the Gaussian shaped pulse (dash line) with $\tau = 10 \tau_D$

图 3 给出光脉冲的瞬时扫频 $\delta\omega$ 与时间 t 及 B 因子的关系曲线. 具体考虑两种情况:

2.2.1 B 因子足够大(即 $\tau \gg \tau_D$)

在这种具有缓变振幅的长脉冲光激励下, GaAs 内的载流子变化经历了瞬态、稳态和瞬态的过程, 对脉冲的瞬时扫频和啁啾的影响由图 4 给出, 主要表现在光脉冲的前沿和后沿.

2.2.2 B 因子趋于零(即 $\tau \ll \tau_D$)

此时, GaAs 内自由载流子的产生简单地与光通量成比例. 双极扩散还未改变载流子分布时, 光脉冲已通过了 GaAs, 因而, 光脉冲的啁啾产生与 1) 所讨论的情况只有一常系数的差别.

3 解释性实验

采用图 5 所示的装置, 用时间分辨率为 10 ps 的条纹相机记录光脉冲的时间演变过程. 初始光脉冲由对撞锁模的主被动 Nd:YAG 激光器提供, 在 GaAs 上的光强 $\sim 200 \text{ MW/cm}^2$; GaAs 片厚 0.5 mm, 通光方向沿(100)晶向, 并双面镀有 $1.06 \mu\text{m}$ 增透膜; 用光栅对对光脉冲进行色散补偿. 条纹相机记录到的光脉冲形状由图 6 给出: 1、2、3 分别为入射光、经 GaAs 的出射光和通过光栅的光脉冲, 4 为未通过 GaAs 而直接经过光栅对的光脉冲. 由图可见: 光脉冲通过 GaAs 后, 由于 GaAs 的双光子吸收作用而被展宽^[9]; 通过光栅对的色散补偿后, 表现出前沿压缩和后沿展宽; 这显然不同于因激光器本身输出的带有啁啾的光脉冲经过光栅对后的压缩情况. 根据光栅对色散补偿特性, 经过 GaAs 后的光脉冲必然在其前后沿具有符号相反的啁啾, 这与本文在 2.1 中所得到的结论相一致.

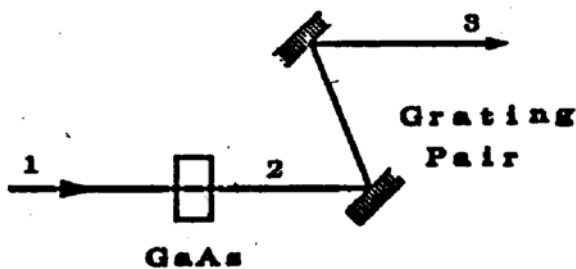


Fig. 5 Schematic diagram of the experimental setup

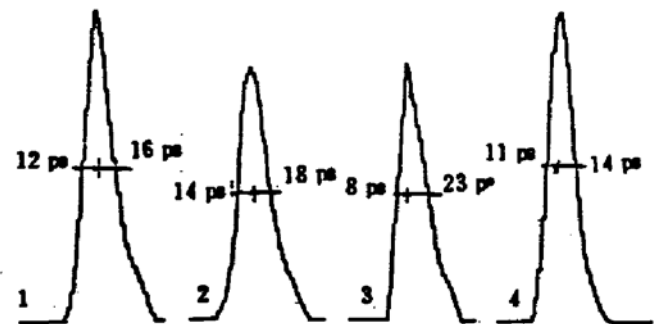


Fig. 6 Streak camera traces of the laser pulses

4 结 论

强光短脉冲通过 GaAs 时, 因自由载流子产生而引起的感生非线性折射率将使光脉冲具有时变的附加位相, 从而产生前后沿符号相反的啁啾. 经过光栅对的色散补偿后, 这种作用表现为前沿压缩和后沿展宽. 如考虑脉冲对撞效应, GaAs 内光感生折射率的周期调制和双极扩散引起的载流子快弛豫都会影响到啁啾的产生.

参 考 文 献

- [1] D. Kuhlke, W. Rudolph, On chirped pulses from a cw dye laser in the colliding pulses mode locking regime. *Opt. & Quantum Electron.*, 1984, **16**(1): 57~64
- [2] S. de Silvestri, P. Laporta, O. Svelto, The role of cavity dispersion in cw mode locked lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **QE-20**(5): 533~539
- [3] R. S. Miranda, G. R. Jacobovitz, C. H. B. Cruz *et al.*, Positive and negative chirping of laser pulses shorter than 100 fs in saturable absorber. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(4): 224~226
- [4] W. B. Jiang, D. C. Sun, F. M. Li, The influence of colliding pulses on the chirp production of a saturable absorber. *Opt. Commun.*, 1987, **65**(5): 449~453
- [5] P. C. Becker, H. L. Fragnito, C. H. B. Cruz *et al.*, Femtosecond intervalley scattering in GaAs. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(21): 2089~2090
- [6] Z. Zhang, L. Qian, D. Fan *et al.*, GaAs: A new material to accomplish passively mode-locked Nd: YAG laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(4): 419~421
- [7] R. K. Jain, K. B. Klain, *Optical Phase Conjugation*, edited by R. A. Fisher (Academic Press, New York, 1983), : 307
- [8] A. Agnesi, G. P. Banfi, M. Ghigliazza *et al.*, Picosecond nonlinear optical characterization of GaAs at 1 μm . *Proc. SPIE*, 1990, **1282**: 50~54
- [9] T. F. Boggess, A. L. Smirl, S. C. Moss *et al.*, Optical limiting in GaAs. *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-21**(5): 488~492

The Chirp Production of Picosecond Light Pulse in a Semiconductor GaAs

Zhang Zhuhong Fan Dianyuan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 24 March 1992; revised 17 June 1992)

Abstract The frequency shift and chirp arising from the nonlinear refractive index induced by free-carrier generation in GaAs have been investigated. A qualitatively experimental result is given out.

Key words GaAs, chirp.