

太赫兹场和倾斜磁场对超晶格电子动力学特性调控规律研究

王长 曹俊诚

Nonlinear electron transport in superlattice driven by a terahertz field and a tilted magnetic field

Wang Chang Cao Jun-Cheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 090502 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.090502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.090502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于人工蜂群算法的混沌信号盲分离方法

[A blind source separation method for chaotic signals based on artificial bee colony algorithm](#)

物理学报.2015, 64(9): 090501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.090501>

随机激励下双稳态压电俘能系统的相干共振及实验验证

[Broadband energy harvesting from coherence resonance of a piezoelectric bistable system and its experimental validation](#)

物理学报.2015, 64(8): 080503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.080503>

具有时滞反馈的非对称双稳系统中的振动共振研究

[Vibrational resonance in an asymmetric bistable system with time-delay feedback](#)

物理学报.2015, 64(7): 070507 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.070507>

外加磁场压电悬臂梁能量采集系统的磁化电流法磁力研究

[Magnetic force of piezoelectric cantilever energy harvesting system with an externally applied magnetic field based on magnetizing current method](#)

物理学报.2015, 64(6): 060502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.060502>

Duffing 振子微弱信号检测盲区消除及检测统计量构造

[Blind angle elimination method in weak signal detection with Duffing oscillator and construction of detection statistics](#)

物理学报.2015, 64(6): 060503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.060503>

太赫兹场和倾斜磁场对超晶格电子动力学特性调控规律研究*

王长† 曹俊诚

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 中国科学院太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050)

(2014年11月18日收到; 2014年12月10日收到修改稿)

微带超晶格在磁场和太赫兹场调控下表现出丰富而复杂的动力学行为, 研究微带电子在外场作用下的输运性质对于太赫兹器件设计与研制具有重要意义. 本文采用准经典的运动方程描述了超晶格微带电子在沿超晶格生长方向(z 方向)的THz场和相对于 z 轴倾斜的磁场共同作用下的非线性动力学特性. 研究表明, 在太赫兹场和倾斜磁场共同作用下, 超晶格微带电子随时间的演化表现出周期和混沌等新奇的运动状态. 采用庞加莱分支图详细研究了微带电子在磁场和太赫兹场调控下的运动规律, 给出了电子运行于周期和混沌运动状态的参数区间. 在电场和磁场作用下, 微带电子将产生布洛赫振荡和回旋振荡, 形成复杂的协同耦合振荡. 太赫兹场与这些协同振荡模式之间的相互作用是导致电子表现出周期态、混沌态以及倍周期分叉等现象的主要原因.

关键词: 太赫兹, 超晶格, 混沌, 分支图

PACS: 05.45.-a, 72.30.+q, 73.61.Ey, 73.50.Fq

DOI: 10.7498/aps.64.090502

1 引言

近年来, 太赫兹场和磁场作用下半导体超晶格微带电子的输运性质在理论上和实验上都引起了人们的广泛关注^[1-11]. 由于太赫兹波的光子能量与超晶格的特征能量(如电子的费米能级、回旋共振能量等)相比拟, 研究人员在太赫兹波作用下的超晶格系统中观察到了许多有趣的物理现象^[12-21], 如Shapiro台阶^[12]、太赫兹谐波产生^[13]、多稳态现象^[14]、相干霍尔效应^[15]、斯塔克回旋共振^[16]以及混沌^[17-21]等.

半导体超晶格中的混沌现象是由Bulashenko等^[17]首先发现的. 他们在研究弱耦合超晶格的电场畴以及电流自振荡现象时发现, 如果在电流周期性振荡的超晶格上施加一个幅度较小的交流信号时, 由于超晶格中周期性振荡的聚集电荷波与外加

交流信号的相互影响, 超晶格的电流振荡可能不再是周期性的, 其电流振荡模式会出现周期、准周期及混沌等不同的状态. Zhang等^[18]在实验上证实了文献^[17]报道的时空混沌现象. Cao等^[19]考虑量子点超晶格中各种散射机理, 详细研究了微带超晶格的耗散混沌性质.

尽管人们在超晶格电子输运的研究中取得了重要进展, 但是其中的一些关键问题, 如太赫兹场和倾斜磁场对超晶格电子的非线性动力学特性调控规律仍然知之甚少. 这里, 我们主要讨论外加太赫兹场沿超晶格生长方向(z 轴)和磁场相对于 z 轴倾斜情况下, 超晶格微带电子的非线性输运性质. 由于太赫兹场和磁场的作用, 微带电子的运动将变得非常复杂. 电子动量随时间的演化可以表现为周期或者混沌等不同的运动性质. 与之前的研究^[20,21]不同, 本文中我们考虑了施加太赫兹场时,

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2014CB339803)、国家高科技研究发展计划(批准号: 2011AA010205)、国家自然科学基金(批准号: 61204135, 61131006, 61321492)、国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2011YQ150021)、02国家科技重大专项(批准号: 2011ZX02707)、中科院创新团队国际合作伙伴计划和上海市科学技术委员会(批准号: 14530711300)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cwang@mail.sim.ac.cn

不同磁场情况下超晶格微带电子的非线性输运性质. 我们采用庞加莱分支图研究了倾斜磁场和太赫兹场对电子动力学特性的调控规律, 在参数空间区分了周期运动和混沌运动区域. 这些结果对于理解超晶格电子的运动规律, 研制基于半导体超晶格的太赫兹器件具有重要参考价值.

2 电场和倾斜磁场作用下超晶格电子运动方程

我们考虑电子在 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 超晶格最低微带内的运动, 忽略微带间的电子转移效应. 根据准经典理论, 当超晶格系统外加电场 \mathbf{E} (平行于 z 方向) 和倾斜磁场 \mathbf{B} (与 z 轴夹角为 θ) 时, 电子受到电场力和洛伦兹力的共同作用. 在外力作用下, 超晶格微带电子的动量变化率 $d\mathbf{p}/dt$ 可以表示为

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = -e \{ \mathbf{E} + [\nabla_{\mathbf{p}} \varepsilon(\mathbf{p}) \times \mathbf{B}] \}, \quad (1)$$

其中, e 是电子电量, $\mathbf{E} = (0, 0, -E)$ 是平行于 z 轴的外加电场, $\mathbf{B} = (0, B \sin \theta, B \cos \theta)$ 是外加磁场, $\varepsilon(\mathbf{p})$ 是电子能量色散关系. 在紧束缚近似下, 微带电子的能量色散关系可以表示为

$$\varepsilon(\mathbf{p}) = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2m^*} + \frac{\Delta}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{p_z d}{\hbar} \right) \right]. \quad (2)$$

这里, $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$ 是电子的动量, m^* 是电子有效质量, d 是超晶格周期, Δ 是微带宽度, \hbar 是普朗克常数.

我们考虑外加时变电场

$$E(t) = E_0 + E_1 \cos(2\pi f_{ac} t),$$

其中 E_0 为直流分量, $E_1 \cos(2\pi f_{ac} t)$ 为交流分量, 交流分量的振幅为 E_1 , 振荡频率 f_{ac} 处于太赫兹频段. 我们将外加电场和电子能量色散关系代入方程 (1) 并化简, 可以得到电子动量的分部表达式

$$\frac{dp_x}{dt} = \frac{\Delta dm^* \omega_c}{2\hbar} \sin \left(\frac{p_z d}{\hbar} \right) \tan \theta - \omega_c p_y, \quad (3)$$

$$\frac{dp_y}{dt} = \omega_c p_x, \quad (4)$$

$$\frac{dp_z}{dt} = e [E_0 + E_1 \cos(2\pi f_{ac} t)] - \omega_c p_x \tan \theta. \quad (5)$$

在以上表达式中, 回旋振荡频率 ω_c 定义为 $\omega_c = eB \cos \theta / m^*$. 经过化简, 我们得到

$$\frac{d^2 p_y}{dt^2} + \omega_c^2 p_y$$

$$= \Lambda \sin [K p_y - \omega_B t - \Gamma \sin(\omega_{ac} t) + \varphi], \quad (6)$$

其中, $\Lambda = -\Delta dm^* \omega_c^2 \tan \theta / 2\hbar$, $K = d \tan \theta / \hbar$, $\Gamma = e E_1 d / \hbar \omega_{ac}$, $\omega_{ac} = 2\pi f_{ac}$, $\varphi = d[p_z(0) + p_y(0) \tan \theta] / \hbar$, $\omega_B = e E_0 d / \hbar$ 是微带电子的布洛赫振荡频率. 由于电子在超晶格微带中运动时会发生弹性和非弹性散射过程, 从而对电子的动量变化产生影响. 我们在方程 (6) 的左边引入一个弛豫项 $\gamma \frac{dp_y}{dt}$ 来表征电子的散射效应. 这样, 方程 (6) 变成

$$\frac{d^2 p_y}{dt^2} + \gamma \frac{dp_y}{dt} + \omega_c^2 p_y = \Lambda \sin [K p_y - \omega_B t - \Gamma \sin(\omega_{ac} t) + \varphi]. \quad (7)$$

由于在倾斜磁场作用下, 电子动量 p_x , p_y 和 p_z 互相耦合, 因此, 我们引入的弛豫项 $\gamma \frac{dp_y}{dt}$ 也影响了 x 和 z 方向的电子动量 p_x 和 p_z . 方程 (7) 就是描述在电场和倾斜磁场共同作用下超晶格微带电子运动的方程. 我们数值求解方程 (7) 可以得到电子动量随时间的演化关系.

3 微带超晶格电子的动力学特性

在外加电场和倾斜磁场共同作用下, 超晶格系统形成了一个典型的非线性动力学系统. 在电场作用下, 电子会产生布洛赫振荡, 同时, 由于磁场的作用, 会发生回旋振荡. 当外加交流电场作用到超晶格系统时, 电子的动力学行为将受制于由布洛赫振荡、回旋振荡和交流场振荡形成的协同振荡模式, 电子的动量 p_y 随时间的变化将表现出复杂的振荡形态. 我们将通过改变外加电场和磁场实现对电子动量的调控. 在数值计算中, 超晶格的周期为 $d = 10.6$ nm, 微带宽度为 $\Delta = 26.2$ meV, 电子有效质量为 $m^* = 0.067 m_0$ (m_0 为自由电子质量), $\gamma = 10^{12} \text{s}^{-1}$.

为了对参数空间中电子动量随时间演化有一个清晰的描述, 并且对周期态和混沌态进行区分, 我们采用庞加莱分支图进行分析. 庞加莱分支图的定义方式如下. 对每一个交流场的振幅 E_1 , 定义在瞬态过程消失之后的电子动量 $p_{ym} = p_y(m T_{ac})$ (其中, $m = 1, 2, 3, \dots$, $T_{ac} = 1/f_{ac}$) 作为 E_1 的函数, 构成庞加莱分支图. 图 1 给出了 $B = 1.6$ T, $\omega_B = 2\omega_c$, $\omega_{ac} = 0.8\omega_c$, $\theta = 60^\circ$ 时, 超晶格电子动量 p_y 的庞加莱分支图. 我们观察到, 对于某些交流场强 E_1 , 其对应的电子动量 p_{ym} 为有限个数, 这

时系统表现为周期态. 而对于另外一些交流场强 E_1 , 其对应很多个不同的电子动量 p_{ym} . 如果将 m 的取值继续增大, 其对应的电子动量 p_{ym} 也将会继续增多, 这时的系统表现为混沌态. 在实际计算中, 我们取 $m = 1, 2, 3, \dots, 300$. 通过观察数据点的密集程度可以直观的区别周期态区域和混沌态区域, 而周期振荡区域又可以分成4-周期、8-周期等不同的区域. 从图1看到, 当 $E_1 < 1.47$ kV/cm时, 每一个交流场强 E_1 对应4个电子动量 p_{ym} , 系统为4-周期态; 当 $E_1 > 2.365$ kV/cm时, 每一个交流场强 E_1 对应8个电子动量 p_{ym} , 系统为8-周期态. 当 $1.47 \leq E_1 \leq 2.365$ kV/cm时, 系统解的演化较复杂, 周期解和混沌解交替出现. 这表明超晶格微带电子的动力学行为对外加交流场的变化十分敏感, 交流场强 E_1 的微小变化就有可能导致电子运动状态在周期态与混沌态之间进行转换.

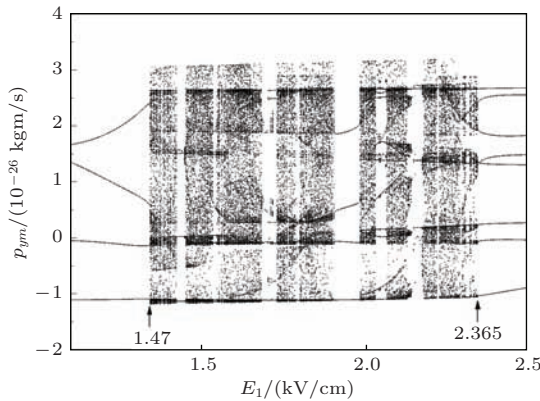


图1 $B = 1.6$ T, $\omega_B = 2\omega_c$, $\omega_{ac} = 0.8\omega_c$, $\theta = 60^\circ$ 时, 超晶格电子动量 p_y 的庞加莱分支图

Fig. 1. Poincaré bifurcation diagram of electron momentum p_y versus ac amplitude E_1 . In the calculation, the parameters are set as $B = 1.6$ T, $\omega_B = 2\omega_c$, $\omega_{ac} = 0.8\omega_c$, and $\theta = 60^\circ$.

在图2中, 我们描述了磁感应强度 $B = 2$ T时, 超晶格电子动量 p_y 的庞加莱分支图. 其他参数保持不变: $\omega_B = 2\omega_c$, $\omega_{ac} = 0.8\omega_c$, $\theta = 60^\circ$. 从图中观察到, 当 $E_1 < 2.208$ kV/cm和 $E_1 > 2.792$ kV/cm时, 系统解为周期态; 当 $2.208 \leq E_1 \leq 2.792$ kV/cm时, 系统中发现了周期态和混沌态, 但是周期态只在很小的参数范围内出现, 混沌态占据参数空间的大部分区域. 值得注意的是, 在 $E_1 < 2.208$ kV/cm区域, 超晶格系统中出现了倍周期分叉现象; 而在 $E_1 > 2.792$ kV/cm区域, 系统出现了周期收敛的情况. 从图1和图2中可以看到超晶格电子的运动状态对磁感应强度 B 也有很强的依赖性. 通过研究发现, 外加交流场的振荡、电子的布洛赫振

荡以及磁场引起的电子回旋振荡相互耦合是导致电子动量随时间的演化表现出周期态、混沌态、以及周期分岔、周期收敛等新奇的现象的主要原因.

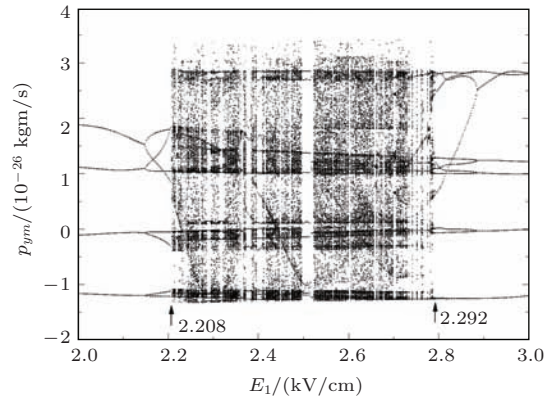


图2 $B = 2$ T, $\omega_B = 2\omega_c$, $\omega_{ac} = 0.8\omega_c$, $\theta = 60^\circ$ 时, 超晶格电子动量 p_y 的庞加莱分支图

Fig. 2. Poincaré bifurcation diagram of electron momentum p_y versus ac amplitude E_1 with parameters $B = 2$ T, $\omega_B = 2\omega_c$, $\omega_{ac} = 0.8\omega_c$, and $\theta = 60^\circ$.

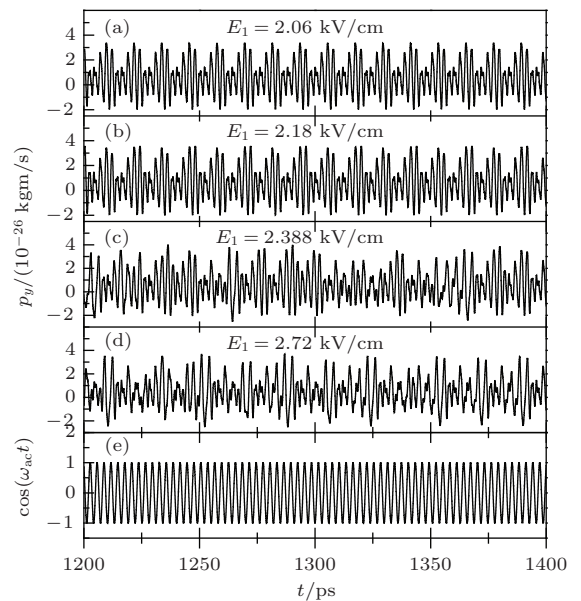


图3 交流场强 E_1 取值为(a) 2.06, (b) 2.18, (c) 2.388和(d) 2.72 kV/cm时, 电子动量 p_y 随时间的演化, 其他参数取值与图2中相同. (e) 为 $\cos(\omega_{ac}t)$ 随时间的演化

Fig. 3. Temporal evolution of electron momentum p_y for different values of E_1 : (a) 2.06, (b) 2.18, (c) 2.388, and (d) 2.72. The other parameters are the same as those in Figure 2. (e) Time evolution of $\cos(\omega_{ac}t)$.

图3给出了外加交流场强 E_1 为(a) 2.06, (b)2.18, (c)2.388和(d) 2.72 kV/cm时, 电子动量 p_y 随时间的演化. 为了与外加交流场的振荡形态相比较, 图3(e)表示了 $\cos(\omega_{ac}t)$ 随时间的变化关系. 从图中可以看到, 图3(a)和(b)中电子动量随时间演化会重复出现, 其振荡具有周期性. 这一特

征与图2中 $E_1 = 2.06$ 和 2.18 kV/cm 时, 庞加莱分支图对应4-周期态和8-周期态相符合. 图3(c)和(d)中电子动量随时间的振荡不规则. 若将时间加长, 我们会发现其振荡不具有周期性. 这一特征与图2中 $E_1 = 2.388$ 和 2.72 kV/cm 时, 庞加莱分支图对应很多个分布不均匀的点相符合, 其运动状态为混沌态.

对图3中电子动量的时间序列作傅里叶变换得到的功率谱图如图4所示. 根据图4可以得到电子动量函数的功率谱所包含的频率分量和相应的能量分布. 从图4(a)和(b)可以看出, 傅里叶变换谱的峰值分别出现在 $if_{ac}/4$ 和 $if_{ac}/8$ ($i = 1, 2, 3, \dots$), 对应于4-周期态和8-周期态. 而图4(c)和(d)的功率谱中, 其能量峰值分布比较复杂, 不仅在 if_{ac} 处发现了主要的能量峰分布, 而且在这些主要的能量峰之间存在一些幅度较小的能量峰, 这是系统出现混沌态的典型特征.

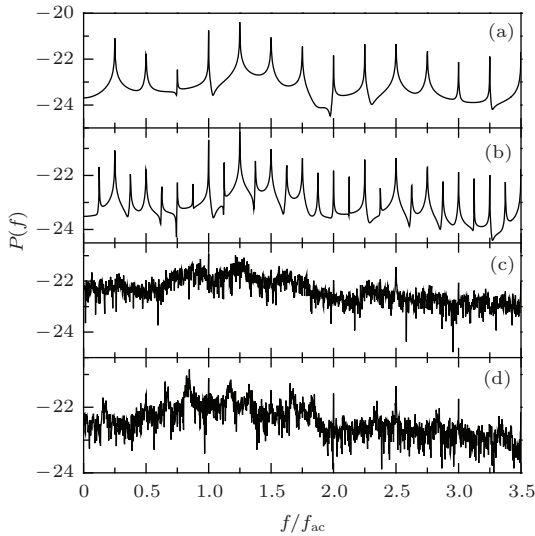


图4 交流场强 E_1 取值为(a) 2.06, (b) 2.18, (c) 2.388 和(d) 2.72 kV/cm 时, 电子动量 $p_y(t)$ 的功率谱图. 其他参数取值与图2中相同

Fig. 4. Power spectra of electron momentum $p_y(t)$ for four different values of E_1 : (a) 2.06, (b) 2.18, (c) 2.388, and (d) 2.72. The other parameters are same as those in Figure 2.

4 结 论

本文从理论上研究了超晶格微带电子在太赫兹场和倾斜磁场共同作用下的动力学过程. 我们发现, 在外场作用下, 电子的动量呈现不同的运动状态, 通过改变磁感应强度 B 和太赫兹场振幅 E_1 可以实现对微带电子运动状态的调控. 采用庞加莱分支图, 在参数空间区分了周期区域和混沌区域. 然后, 我们对电子动量的时间序列进行傅里叶变换,

得到了周期态和混沌态的功率谱图, 观察到了电子呈现周期态和混沌态时的能量在不同频率下的分布特征. 功率谱图也可以作为判别周期态和混沌态的方法.

在本文的研究中, 我们主要讨论了布洛赫振荡频率 ω_B 和回旋振荡频率 ω_c 满足 $\omega_B = i\omega_c$ 的情况. 这是因为当 $\omega_B \neq i\omega_c$ 时, 在参数空间中电子动量随时间演化主要表现出混沌运动状态, 只有在很少的参数空间中发现了周期态. 而当 $\omega_B = i\omega_c$ 时, 系统中的周期态与混沌态区域分布明显, 通过调节外场参数, 周期态和混沌态的转换非常清晰.

参考文献

- [1] Lei X L, Horing N J M, Cui H L 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 3277
- [2] Waschke C, Roskos H G, Schwedler R, Leo K, Kurz H, K. Köhler 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 3319
- [3] Winnerl S, Schomburg E, Brandl S, Kus O, Renk K F, Wanke M C, Allen S J, Ignatov A A, Ustinov V, Zhukov A, Kop'ev P S 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 1259
- [4] Sun B, Wang J, Ge W, Wang Y, Jiang D, Zhu H, Wang H, Deng Y, Feng S 1999 *Phys. Rev. B* **60** 8866
- [5] Wacker A 2002 *Phys. Rep.* **357** 1
- [6] Zhang Q Y, Tian Q 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1804 (in Chinese) [张启义, 田强 2002 物理学报 **51** 1804]
- [7] Hyart T, Mattas J, Alekseev K N 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 117401
- [8] Wang R Z, Yuan R, Song X M, Wei J S, Yan H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3437 (in Chinese) [王如志, 袁瑞, 宋雪梅, 魏金生, 严辉 2009 物理学报 **58** 3437]
- [9] Wang C, Cao J C 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 053711
- [10] Li W, Reidler I, Aviad Y, Huang Y, Song H, Zhang Y, Rosenbluh M, Kanter I 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 044102
- [11] Ignatov A A 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 084506
- [12] Unterrainer K, Keay B J, Wanke M C, Allen S J, Leonard D, Medeiros-Ribeiro G, Bhattacharya U, Rodwell M J W 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 2973
- [13] Lei X L 1997 *J. Appl. Phys.* **82** 718
- [14] Aguado R, Platero G 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4971
- [15] Bauer T, Kolb J, Hummel A B, Roskos H G, Kosevich Y, Klaus Köhler 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 086801
- [16] Kosevich Y A, Hummel A B, Roskos H G, Köhler K 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 137403
- [17] Bulashenko O M, Bonilla L L 1995 *Phys. Rev. B* **52** 7849
- [18] Zhang Y, Kastrup J, Klann R, Ploog K H, Grahn H T 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 3001
- [19] Cao J C, Liu H C, Lei X L 2000 *Phys. Rev. B* **61** 5546
- [20] Fromhold T M, Patane A, Bujkiewicz S, Wilkinson P B, Fowler D, Sherwood D, Stapleton S P, Krokhin A A, Eaves L, Henini M, Sankeshwar N S, Sheard F W 2004 *Nature* **428** 726
- [21] Wang C, Wang F, Cao J C 2014 *Chaos* **24** 033109

Nonlinear electron transport in superlattice driven by a terahertz field and a tilted magnetic field*

Wang Chang[†] Cao Jun-Cheng

(Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(Received 18 November 2014; revised manuscript received 10 December 2014)

Abstract

Vertical electron transport in semiconductor superlattice has been the focus of science and technology during the past two decades due to the potential application of superlattice in terahertz devices. When driven by electromagnetic field, many novel phenomena have been found in superlattice. Here we study the chaotic electron transport in miniband superlattice driven by dc+ac electric fields along the growth axis (z -axis) and a magnetic field tilted to z -axis using semiclassical equations of motion in the presence of dissipation. We calculate the electron momentum by changing the magnetic field or amplitude of the terahertz field. It is shown that the momentum $p_y(t)$ of miniband electron exhibits complicated oscillation modes while changing the control parameters. Poincaré bifurcation diagram and power spectrum are adopted to analyze the nonlinear electron states. Poincaré bifurcation diagram is obtained by plotting $p_{ym} = p_y(mT_{ac})$ (with $m = 1, 2, 3, \dots$ and T_{ac} the period of ac terahertz field) as functions of ac amplitude E_1 after the transients decay. The periodic and aperiodic regions can be distinguished from each other since there are a large number of points in the chaotic regions. When the magnetic field is increased from 1.5 to 2 T, the Poincaré bifurcation diagram changes dramatically due to the strong effect of magnetic field on electron motion. The oscillating state of $p_y(t)$ may be changed between periodic and chaotic states. Power spectra of electron momentum p_y for different values of E_1 ($= 2.06, 2.18, 2.388, \text{ and } 2.72$) are calculated for a deep insight into the nonlinear oscillating mode. It is found that the power spectra of n -periodic states show peaks at frequencies if_{ac}/n (with $i = 1, 2, 3, \dots$); the power spectra of chaotic states are very irregular with a large number of peaks. We demonstrate that the dissipation and resonance between Bloch oscillation frequency and cyclotron frequency play an important role in the electron transport process. We attribute the emerging of periodic and chaotic states in a superlattice to the interaction between terahertz radiation and internal cooperative oscillating mode related to Bloch oscillation and cyclotron oscillation. In the case of $\omega_B \neq i\omega_c$, the time-dependent electron motion is chaotic in most regions of the parameter space. Results of the present paper are useful for designing terahertz devices based on the semiconductor superlattices.

Keywords: terahertz, superlattice, chaos, bifurcation

PACS: 05.45.-a, 72.30.+q, 73.61.Ey, 73.50.Fq

DOI: 10.7498/aps.64.090502

* Project supported by the 973 Program of China (Grant No. 2014CB339803), the 863 Program of China (Grant No. 2011AA010205), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61204135, 61131006, 61321492), the Major National Development Project of Scientific Instrument and Equipment of China (Grant No. 2011YQ150021), the National Science and Technology Major Project, China (Grant No. 2011ZX02707), the International Collaboration and Innovation Program on High Mobility Materials Engineering of the Chinese Academy of Sciences, and the Shanghai Municipal Commission of Science and Technology (Grant No. 14530711300).

[†] Corresponding author. E-mail: cwang@mail.sim.ac.cn