第9卷 第1期 半导体学报 Vol. 9, No. 1
1988年1月 CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS Jan., 1988

研究快报

准周期 a-Si:H/a-SiN$_x$:H 超晶格*

毛国民 陈坤基 冯端 李志锋 严勇 陈泓 杜家方
(南京大学物理系,固体物理所,南京)

1987年5月23日收到

本文首次报道成功地实现了非晶态半导体准周期(无平移对称性)超晶格结构. 利用辉光放电汽相淀积技术,由两种超薄的 a-Si:H 层和 a-SiN$_x$:H 层按 Fibonacci 序列程序淀积而构成一维准周期超晶格. 其中两种一维周期格子的调制波长比为黄金分割 $\tau=(1+\sqrt{5})/2$. 剖面电子显微像和相应的电子衍射花样揭示出这类新型非晶态半导体超晶格的奇异性质. 简单的理论计算给予实验衍射图像以明确的物理解释.

主题词: 准周期超晶格, Fibonacci 规则, a-Si:H/a-SiN$_x$:H, 电子显微像, 电子衍射图样

近年来已制备出了非晶态半导体"超晶格"或称多层结构. 这类新型的半导体材料由超薄的非晶态半导体层周期性地排列而成. 它们既可以是组份调制的,例如 a-Si:H/a-SiN$_x$:H, a-Si:H/a-SiC$_x$:H, a-Ge:H/a-Si:H; 也可以是掺杂调制的,例如 npnp, nipi 等等. 其独特的物理性质引起了人们极大的兴趣[1].

本文首次报道另一类新型的非晶态半导体超晶格——准周期多层调制结构. 该研究工作的原始设想是与具有五次对称性的准晶体的发现[2]和一维准周期势场中薛定格方程的研究[3]相联系的. 从这点出发,我们选择超薄的 a-Si:H 和 a-SiN$_x$:H 层组成一维的准周期超晶格,而其中两种一维周期格子的调制波长比为黄金分割 $\tau=(1+\sqrt{5})/2$. 为了实现这种准周期超晶格,设想首先确定两种结构单元,然后使它们按 Fibonacci 序列程序生长. 结构单元可由一层或多层的不同材料组成且各层的厚度也可随意选择. 本研究工作所选择的两种结构单元标记为A和B,分别由 (44 Å a-SiN$_x$:H, 66 Å a-Si:H) 和 (44 Å a-SiN$_x$:H, 23 Å a-Si:H) 组成,且 A, B 的厚度比 $L_A/L_B=\tau$. 利用 Fibonacci

图1 理想准周期(Fibonnacci)超晶格结构示意图

S_1: A
S_2: AB
S_3: ABA
S_4: ABAAB
S_5: ABAABABA
S_6: ABAABABAABAAB
⋮
S_n: $S_{n-1}S_{n-2}$
$L_A/L_B=\tau=(1+\sqrt{5})/2$

* 国家自然科学基金资助项目.

序列的一般规则，把两种结构单元 A，B 组成一个准周期结构，如图 1 所示．这种一维准周期超晶格的布拉菲格子由一系列点：$x_{i+1}=x_i+r_i$ 组成，其中 $\{r_i\}$ 为 Fibonacci 序列间隔 $\{L_aL_bL_aL_aL_b\cdots\cdots\}$，该准周期格子实际上由两个周期比例为 τ 的线性独立的周期格子组成，且具有自相似结构的特性．

研究的样品是利用 r.f. 辉光放电汽相淀积技术，在单室反应室中生长而成．原则上讲生长条件的选择可基本上与周期性超晶格结构的生长条件[4]相同，但实际上并非这样简单．因为在一维准周期超晶格中每层的比例都是不可约的，因此必须十分精确控制反应气体的组份才能实现这种无平移对称性的超晶格．我们利用计算机程序控制成功地实现了这类新型超晶格结构．图 2（见图版 I）是典型的准周期 a-Si:H/a-SiN$_x$:H 超晶格结构的剖面透射电子显微像．图中较暗的衬度为 a-SiN$_x$:H 子层，而极明亮的衬度为 a-Si:H 子层，由此而构成非常清晰而细致的 Fibonacci 序列：ABAAB·····，且由图 2 揭示出构成超晶格的两种材料的界面平直而陡峭，界面层厚度平整度优于 5 Å．

图 3（见图版 I）为准周期超晶格的电子衍射图像．在该衍射谱中，清晰地揭示出在透射中心点的两侧的一系列的衍射斑点．该衍射谱的最大特点是所有衍射斑点的空间几何位置均按黄金分割比 τ 进行排列，且各点的衍射强度都具有一定的层次．这样的衍射特征是与周期性超晶格的衍射性质是不同的．由晶体衍射物理知，后者的衍射斑点是由强度几乎相等的无穷数目的布拉格格子组成；而准周期超晶格的衍射斑点是按自相似结构密集排列于一维倒空间的轴线上，每个衍射斑点的本质与周期结构的 δ 函数衍射峰的性质相同，因此原则上讲在倒空间的轴线上衍射斑点数目也是无穷的．但理论分析证明[5]这些衍射斑点中大部分斑点的衍射强度是很微弱的，因此在衍射谱中有可能分辨出清晰的衍射斑点．

表 1　衍射斑点的相对位置，$k_{p,n}=2\pi L_f^{-1}n\tau^p$

编号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\binom{p}{n}$	$\binom{0}{0}$	$\binom{0}{1}$	$\binom{1}{1}$	$\binom{2}{1}$	$\binom{1}{2}$	$\binom{0}{4}$	$\binom{3}{1}$	$\binom{4}{1}$	$\binom{2}{3}$	$\binom{3}{2}$	$\binom{5}{1}$	$\binom{0}{12}$	$\binom{3}{3}$	$\binom{2}{6}$

图 3 中所观察到的明显可分辨的衍射斑点的位置完全符合由理论公式 $k_{p,n}=2\pi\cdot L_f^{-1}n\tau^p$ 所计算的结果，其中 $L_f=\tau L_a+L_b$；n，p 均为整数．每个衍射斑点的位置可用 $\binom{p}{n}$ 来标记．衍射谱中每个衍射斑点的相对位置列于表 1 中，显而易见．$k_{p+1,n}=k_{p,n}+k_{p-1,n}$．$k$ 的实验值与理论计算值的比较另文发表．由这些数值可进一步估算出 Fibonacci 格子的平均层厚 $L_f=\tau L_a+L_b\simeq 250$ Å，这与原先按生长速率 $R_g=1.1$ Å/s 设计的 L_f 值 247 Å 符合得较好．此外从电子衍射谱也可得到实验上的 τ 值，其结果为 $\tau_{exp.}\simeq 1.61\pm 0.01$．

我们已经从实验上成功地实现了一类新型的非晶态半导体超晶格——具有准周期有序的 Fibonacci 超晶格．电子衍射图像揭示了这种非周期超晶格的奇异性质——衍射斑点的自相似结构及幂指数规律．我们相信这类精确控制的准周期超晶格将为电子输运，

晶格动力学等异质结界面物理的研究提供广阔的实验研究手段。

致谢，在剖面电镜样品制备方面得到南京大学物理系黄信凡同志及现代分析中心胡梅生同志的指导和帮助。在此深表谢意。

参 考 文 献

[1] 陈坤基，半导体杂志，12，No 2，26(1987).
[2] D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias and J. W. Cahn, *Phys. Rev. Lett.*, **53**, 1951 (1984).
D. Levine and P. J. Steinhardt, *Phys. Rev. Lett.*, **53**, 2477 (1984).
[3] S. Ostlund and R. Pandit, *Phys. Rev.*, **B29**, 1394 (1984). and reference therein.
[4] 毛国民、陈坤基、杜家方、李志锋、陈泓，已投稿半导体学报.
[5] V. Elser, Phys. *Rev.*, **B32**, 4892 (1985).

Quasiperiodic a-Si:H/a-SiN$_x$:H Superlattices

Mao Guomin, Chen Kunji, Feng Duan, Li Zhifeng, Yan Yong,
Chen Hong and Du Jiafang

(Department of Physics and Solid State Physics Institute, Nanjing University, Nanjing)

Abstract

We report the first realization of an amorphous semiconductor quasiperiodic (no translational symmetry) superlattice. The sample, grown by rf glow discharge technique, consists of alternating ultrathin layers of a-Si:H and a-SiN$_x$:H to form a Fibonacci sequence in which the ratio of incommensurate periods is equal to the golden mean $\tau=(1+\sqrt{5})/2$. The crass section TEM micrograph and diffraction patterns reveal some of the unique properties of these novel structures. The results of simple theoretical calculation expound striking features of the diffraction spectrum associated with the quasiperiodic nature of the structure.

KEY WORDS Quasiperiodic superlattice, Fibonacci rule, a-Si:H/ a-SiN$_x$:H, TEM micrograph, Electron diffraction pattern