

惯性约束聚变实验用平面薄膜的制备及其表面图形的引入*

周斌 王珏 沈军 徐平 吴广明

邓忠生 孙骐 艾琳 陈玲燕

(同济大学波耳固体物理研究所 上海 200092)

韩明 熊斌 王跃林

(中国科学院上海冶金研究所 传感器国家重点实验室 上海 200050)

摘要 平面薄膜是 ICF 分解实验的重要靶型. 以半导体技术结合重掺杂自截止腐蚀制备厚度为 3—4 μm 的 Si 平面薄膜, 以热蒸发结合脱膜工艺制备 Al 平面薄膜, 两者的表面粗糙度分别为 30nm 和 10nm 左右; 进一步采用离子束刻蚀在平面薄膜的表面引入网格或条状图形, 获得测量成像系统像传递函数的刻蚀膜, 控制离子束刻蚀工艺的参数以实现图形的精确转移.

关键词 平面薄膜, 自截止腐蚀, 热蒸发, 离子束刻蚀

PREPARATION OF THIN FOILS AND PATTERN TRANSFER IN INERTIAL CONFINEMENT FUSION EXPERIMENTS

ZHOU Bin WANG Jue SHEN Jun XU Ping WU Guang-Ming DENG Zhong-Sheng

SUN Qi AI Lin CHEN Ling-Yan

(Pohl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

HAN Ming XIONG Bin WANG Yue-Lin

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Metallurgy, Shanghai 200050, China)

Abstract Thin foils are important targets used in inertial confinement fusion experiments. Thin silicon foils with a thickness of 3 to 4 micrometers and a surface roughness of several tens of nanometers were prepared by a semiconductor process together with a self-stopping etching process. Thin aluminum foils with thickness about 1 micron thick and with a surface roughness of about 10 nanometers were prepared by evaporation together with a foil removal process. Through an ion beam etching process, a checked or striped pattern was transferred to the surface of the thin silicon and aluminum foils, to produce the grating foils. The parameters of the ion beam etching process could be varied to control the pattern transfer precision.

Key words thin foils, self-stopping etching process, evaporation, ion beam etching process

1 引言

惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF) 实验是要以均匀的驱动激光光束辐照充有核燃料的球形靶丸, 实现聚心压缩. 驱动光束空间不均匀性的存在, 会引起激光烧蚀后的瑞利-泰勒流体力学不稳定性(Rayleigh-Taylor instability, R-T instability) 的增长, 导致聚心压缩的破坏使点火失败^[1-4].

分解实验是研究驱动光束不均匀性对 R-T 不稳定性作用的重要方法. 近年来, 国外已有报道^[5-8] 开展这方面的研究, 利用 X 射线激光作为探针研究平面薄膜在驱动激光作用下的演变过程, 获得驱动

激光不均匀性对 R-T 不稳定性的作用. 在国内, 开展对驱动光束不均匀性研究的条件已基本满足, 确定的实验方案有两种: 一是以基频光(1.06 μm) 辐照 Ag 或 Ge 靶产生的波长为 13.9nm 或 19.6nm 的 X 射线激光作为探测激光; 二是以低强度的 1.06 μm 基频光辐照烧蚀 Si 或 Al 平面薄膜, 测量激光烧蚀引起的 Si 或 Al 膜的变化, 获得激光烧蚀不均匀的信息, 从而获得驱动激光空间不均匀性的信息.

这一轮实验的进行对自支撑的 Si 和 Al 两种平面薄膜的制备提出了要求, 其中 Si 平面薄膜的厚度

* 国家“八六三”高技术计划惯性约束聚变领域资助项目
2000-12-11 收到初稿, 2001-02-23 修回

为 $3-4\mu\text{m}$, Al 平面薄膜的厚度为微米量级,在 $\phi 600\mu\text{m}$ 范围内表面粗糙度小于 10nm . 进行这一实验还需要以 XUV 成像系统进行薄膜形貌的成像,像传递函数是成像系统的重要参数,需要以成像系统测量具有特殊构型的靶,通过成像与用靶的结构参数的直接比较,获得图像传递过程中的像传递函数. 因此,在 Si 和 Al 平面薄膜制备的基础上,还需在 Si 和 Al 薄膜表面引入图形,获得满足实验要求的 Si 和 Al 刻蚀膜,用于像传递函数的研究.

针对实验要求,开展对 Si 平面薄膜和 Al 平面薄膜制备工艺的研究,以现代半导体技术结合自截止腐蚀工艺,获得自支撑 Si 平面薄膜;以热蒸发结合脱膜工艺制备厚度在微米量级的 Al 平面薄膜;采用离子束刻蚀工艺,在 Si 和 Al 平面薄膜上引入网格或条状图形.

2 实验过程

2.1 Si 平面薄膜的制备及其表面图形的引入

以现代半导体技术结合重掺杂自截止腐蚀工艺实现对 Si 片的定向腐蚀,获得自支撑 Si 平面薄膜;进一步在 Si 平面薄膜的制备过程中,采用离子束刻蚀的工艺,在 Si 薄膜的表面引入网格或条状图形,获得 Si 刻蚀膜. 图 1 为 Si 刻蚀膜的制备流程图,图 1 中去掉步骤(c),(d),(e)即为 Si 平面薄膜的制备流程.

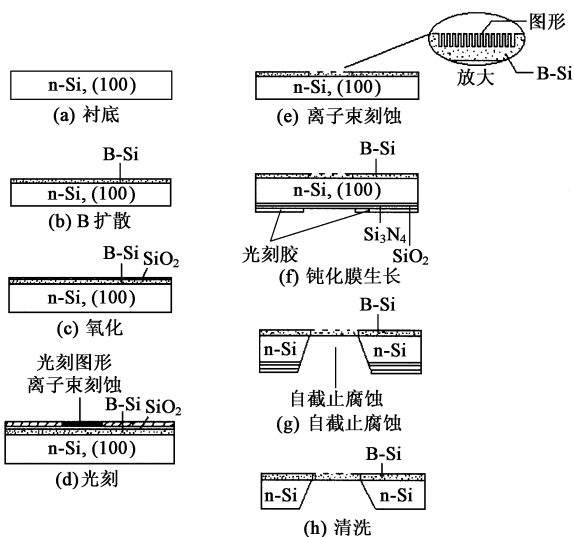


图 1 Si 刻蚀膜的工艺流程图

选用厚度为 $(260 \pm 10)\mu\text{m}$, 电阻率 $\rho = 3-6\Omega \cdot \text{cm}$ 的 n 型 Si 片,以(100)晶面作为扩散和腐蚀平面;先在一面(B 扩面)进行硼(B)扩散工艺,获得杂质 B

的扩散深度约为 $3-4\mu\text{m}$,此深度为所需平面薄膜的厚度;在腐蚀面(B 扩面的另一面)上生长 SiO_2 和 Si_3N_4 层钝化膜,用作自截止腐蚀时的钝化膜;通过紫外光刻在腐蚀面的钝化层上获得 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 腐蚀图形,光刻胶为 Al818 型正胶;选用 KOH 腐蚀液进行自截止腐蚀,控制腐蚀液的浓度和温度来控制腐蚀速率,当腐蚀液腐蚀至含有扩散 B 杂质的 Si 面时,腐蚀速率急剧降低,达到控制 Si 薄膜厚度的目的,这一工艺称为自截止腐蚀^[9];去除 Si_3N_4 层和 SiO_2 层后划片,获得有效面积为 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的 Si 平面薄膜.

在 Si 平面薄膜制备中的 B 扩工艺后,引入光刻和离子束刻蚀工艺,在 B 扩面上获得网格或条状图形,网格图形的尺寸为 $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$,条状图形的线宽为 $5\mu\text{m}$,刻蚀采用中国科学院上海冶金研究所自制的 LK-1 型离子束刻蚀机;再采用 Si 平面薄膜制备的 B 扩以后的工艺,可获得 Si 刻蚀膜.

2.2 Al 平面薄膜的制备及其表面图形的引入

采用热蒸发结合脱膜工艺获得自支撑 Al 平面薄膜,采用离子束刻蚀在 Al 薄膜上引入网格或条状图形.

以抛光玻片为衬底,用四川南光机器厂生产的 H44500C 型真空镀膜机进行 Al 膜的热蒸发,蒸发舟与样品架间距离为 15cm ;以 Mo 为舟,真空度约为 $7 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 时,在玻片表面蒸镀 NaCl 脱膜层,NaCl 脱膜层质地较硬,且平整度高^[10],脱膜工艺简单;在真度优于 $3 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 时,再蒸镀 Al 膜层,蒸发源为 4N 级 Al 丝,以上海第二耐火材料厂的生产导电陶瓷舟作蒸发舟,控制蒸发电压、电流和蒸发时间,以控制 Al 膜层的微结构和厚度;将镀有 NaCl 脱膜层和 Al 薄膜层的玻片在去离子水中脱膜,粘在靶架上制得自支撑 Al 平面薄膜.

相应地采用离子束刻蚀的工艺可将网格或条状图形引入 Al 薄膜上,网格图形的尺寸为 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$,条状图形的线宽为 $25\mu\text{m}$,工艺与上节基本相同.

3 讨论

3.1 自截止腐蚀参数的选择

在 Si 平面薄膜的制备中采用无机的 KOH 系统腐蚀剂.通过实验摸索,确定 KOH 腐蚀剂的浓度为 50%,温度为 50°C ,掺杂 B 的浓度为 10^{19}cm^{-3} .在这一条件下, Si 的(100)面的腐蚀速率约为 $7\mu\text{m}/\text{h}$, Si 的(100)面与(111)面的腐蚀速率比为 $400:1$ ^[11].按

此条件,腐蚀厚度为 $260 \pm 10 \mu\text{m}$,电阻率 $\rho = 3 - 6 \Omega \cdot \text{cm}$ 的 n 型(100)面 Si 片至 $3 - 4 \mu\text{m}$,需 30 - 40h.

3.2 平面薄膜的微结构

以 Leica - Cambridge S360 型扫描电子显微镜观察 Si 和 Al 平面薄膜的表面形貌.图 2 是放大 5000 倍的 Si 平面薄膜的 B 扩面和腐蚀面的微结构形貌,测量显示 Si 薄膜的表面平整.

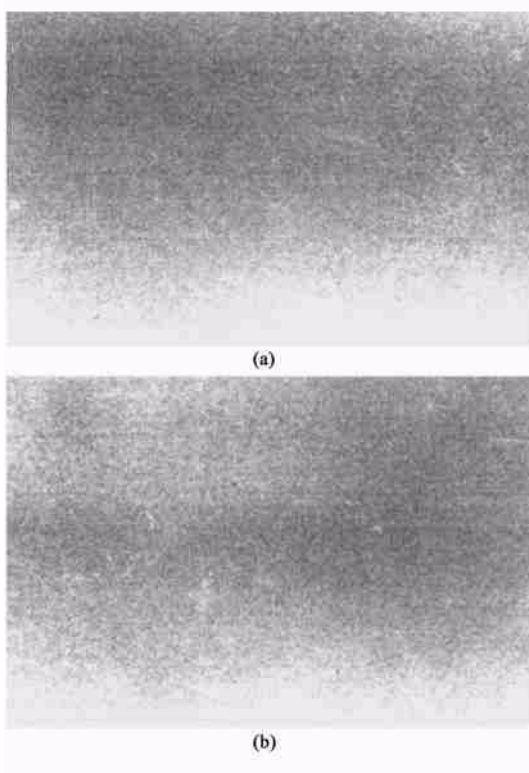


图 2 Si 平面薄膜的 SEM 测量 ($\times 5\ 000$)
(a) B 扩面;(b) 腐蚀面

图 3 示出 Al 薄膜的正、反两面的微结构形貌,放大倍数为 18 000 倍.图 3(a) 是 Al 膜与脱膜剂 NaCl 层接触的一面(反面),图 3(b) 为正面,即膜生长面.图 3 显示 Al 薄膜由微小 Al 晶粒堆积而成,反面颗粒度约为 $0.08 \mu\text{m}$,正面颗粒度约为 $0.13 \mu\text{m}$.这表明,在薄膜的生长过程中,无序堆砌的微小晶粒在不断长大.

3.3 平面薄膜的表面粗糙度

表面粗糙度是平面薄膜的一个重要参数,采用 α -step 500 型台阶仪对 Si 和 Al 平面薄膜进行表面粗糙度测量.测量参数如下:探针压力是 17.9 mg,扫描范围为 $3000 \mu\text{m}$, $1500 \mu\text{m}$, $1000 \mu\text{m}$ 和 $600 \mu\text{m}$.

采用台阶仪测量 Si 薄膜正、反两面(B 扩面、腐蚀面)的粗糙度.测量用 Si 薄膜的厚度为 $4.037 \mu\text{m}$.表 1 是 Si 平面薄膜表面粗糙度的测量结果.测量显示, Si 平面薄膜的表面粗糙度在几十 nm 至 100nm

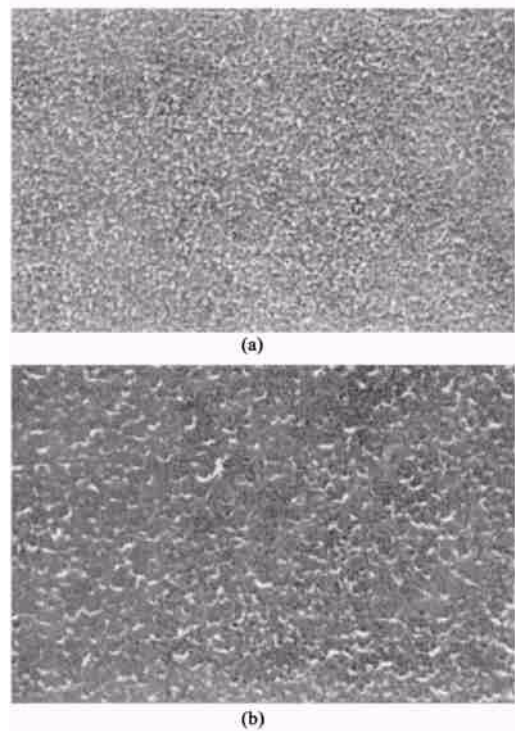


图 3 Al 平面薄膜的 SEM 测量 ($\times 18\ 000$)
(a) 反面;(b) 正面

的范围.Si 薄膜的扩 B 面上表面粗糙度较大(几十 nm),在腐蚀面上表面粗糙度小于 30nm.这一结果距离实验要求仍有差距,但可望通过实验条件的优化和后处理工艺来降低表面粗糙度,这方面的工作正在进行中.

表 1 Si 平面薄膜的表面粗糙度

扫描范围/ μm	表面粗糙度/nm	
	B 扩面	腐蚀面
3000	130.0	25.1
1500	101.1	22.7
1000	48.3	29.4
600	31.4	20.2

Al 平面薄膜的粗糙度测量结果如下:对厚度为 $1.373 \mu\text{m}$ 的 Al 薄膜,在 1 mm 内,表面粗糙度为 5.3 nm.

3.4 离子束刻蚀的工艺选择

离子束刻蚀是常用的图形转移工艺,在 Si 刻蚀膜的制备中,在综合考虑的前提下,确定的刻蚀条件为:在 7×10^{-6} Torr (1 Torr = 133.3 Pa) 的真空度下,离子能量是 500eV,离子密度是 0.35 mA/cm^2 ,以厚度为 $1.5 \mu\text{m}$ 的光刻胶和厚度为 200nm 的 SiO_2 层作为掩膜,离子束垂直轰击 Si 片,以半导体制冷机对刻蚀 Si 片制冷.由于刻蚀的 Si 片中含有掺杂的 B 杂质且

浓度较高,所以采用上述相同条件时,对纯 Si 的刻蚀速率远大于对含 B 杂质 Si 的刻蚀速率.对含杂质 B 的 Si 片的刻蚀,刻蚀深度为 $1\mu\text{m}$ 需时为 100 min,刻蚀速率约为 $10\text{nm}/\text{min}$.

以台阶仪测量图形的刻蚀深度.图 4 是具有网格图形的 Si 刻蚀膜的刻蚀深度结果,其中 Si 薄膜的厚度为 $4.037\mu\text{m}$.图 4 显示,经过离子束刻蚀工艺,网格图形被较好地转移至 Si 薄膜的表面,刻蚀的深度在 962.2nm .对具有条状图形的 Si 刻蚀膜也进行了台阶仪测量,但是由于它的线宽仅为 $5\mu\text{m}$,刻蚀区域又存在倒梯形的形貌,同时测量用探针较粗,导致台阶仪仅能获得初步的表面的起伏形貌,未能获得刻蚀深度.考虑到进行离子束刻蚀时采用的条件与制备网格图形的条件相同,可以认为两者的刻蚀深度是一致的.

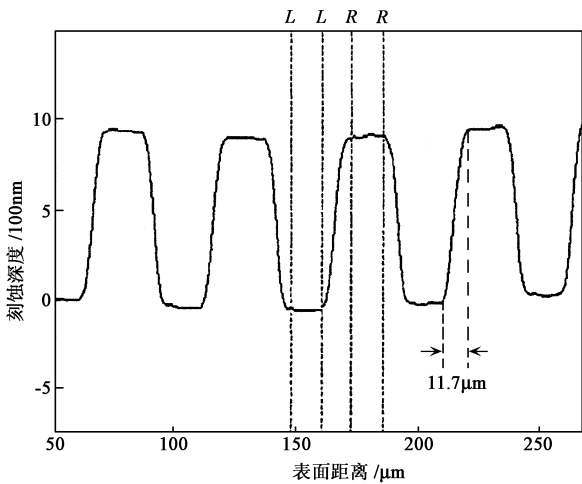


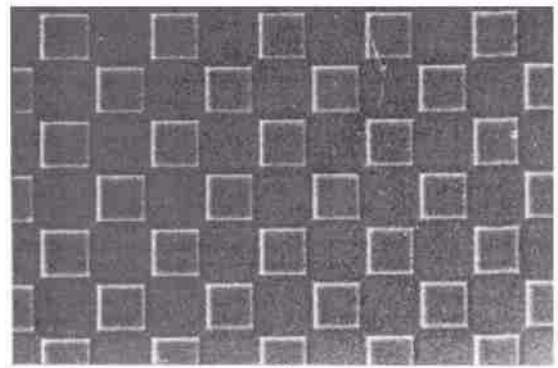
图 4 网格图形的 Si 刻蚀靶的台阶仪测量结果

Al 膜的刻蚀条件为: 400eV 氩离子束,真空度为 $1.7 \times 10^{-4}\text{Torr}$,束流密度为 $0.25\text{mA}/\text{cm}^2$,基片转速为 $10\text{r}/\text{min}$,基片冷却.对 Al 刻蚀膜的台阶仪测量表明,刻蚀深度为 500nm .

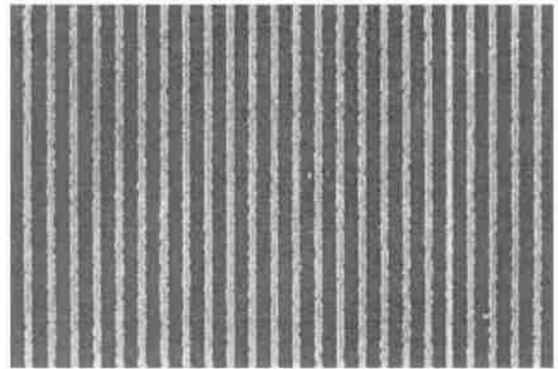
3.5 图形的刻蚀形貌

以 Leica Cambridge S360 型扫描电子显微镜观察 Si 和 Al 刻蚀膜的刻蚀图形形貌.图 5 是放大 500 倍的具有网格和条状图形的 Si 刻蚀膜的表面形貌.图 6 是放大 2500 倍的具有网格图表的 Si 刻蚀膜的形貌.从图 5 和图 6 可见,采用离子束刻蚀能较好的将图形转移至 Si 薄膜的表面,图形的基本形貌得到维持,但两种图形中的被刻蚀部分的线宽都大于未被刻蚀部分的线宽.

图 7 是放大 400 倍的 Al 刻蚀膜的形貌,其中 Al 膜上的网格尺寸为 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$,条状图形线宽为



(a)



(b)

图 5 Si 刻蚀膜的表面形貌 ($\times 500$)

(a) 网格;(b) 条状

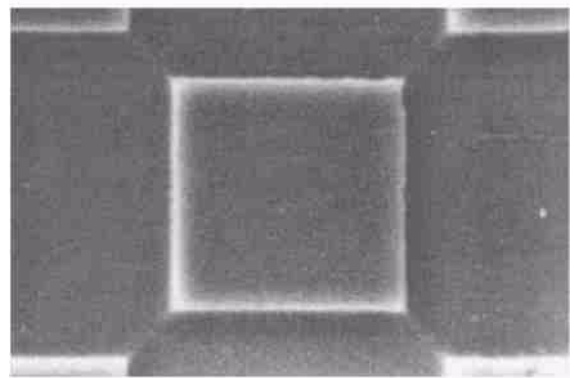


图 6 网格图形的 Si 刻蚀靶的形貌 ($\times 2500$)

$25\mu\text{m}$.图 7 显示,Al 膜上的刻蚀情况与 Si 膜上的基本类似,也存在小的图形畸变.

4 结论

利用重掺杂自截止腐蚀原理,制备获得厚度为 $3-4\mu\text{m}$ 的自支撑 Si 平面薄膜.对 Si 平面薄膜的测量表明,在 $1000\mu\text{m}$ 内的扫描范围内, Si 平面薄膜的 B 扩面和腐蚀面的表面粗糙度分别为 50nm 和 30nm 左右.以热蒸发结合脱膜工艺制备自支撑 Al 平面薄膜,通过控制制备工艺条件来控制 Al 膜晶粒生长,

物理

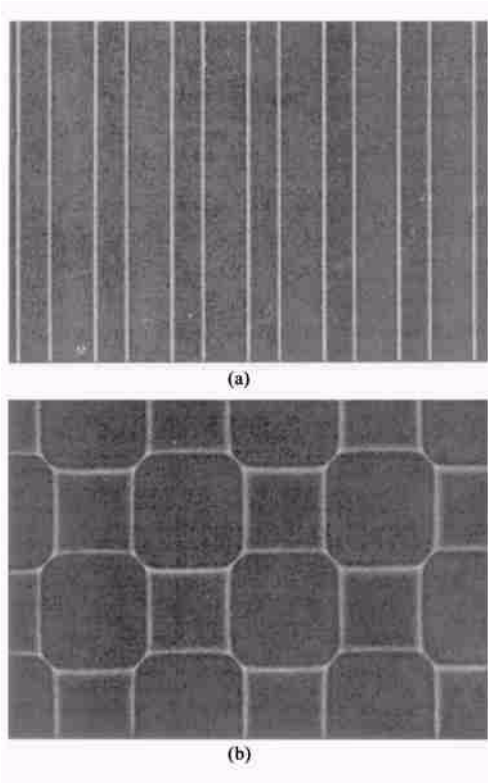


图7 Al刻蚀膜的形貌($\times 400$)
(a)条状;(b)网格

以达到控制 Al 薄膜微结构的目的,Al 平面薄膜表面粗糙度小于 10nm.

采用离子束刻蚀工艺,在 Si 和 Al 薄膜表面引入网格或条状图形,获得实验要求的 Si 和 Al 刻蚀膜,SEM 测量显示刻蚀工艺可较好地 将图形转移至 Si 和 Al 膜的表面.

参 考 文 献

- [1] Taylor G *et al.* Proc. R. Soc. London, Ser. A, 1950, A201 :192
- [2] Kilkenny J D *et al.* Phys. Plasmas., 1994, 1 :1379
- [3] Bradley D K *et al.* Phys. Rev. Lett., 1992, 68 :2774
- [4] Desselberger M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 75 :2961
- [5] Kalantar D H *et al.* Phys. Rev. Lett., 1996, 76 :3574
- [6] Boehly T R *et al.* J. Appl. Phys., 1999, 85 :3444
- [7] Desselberger M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1992, 68 :1539
- [8] Watt R W *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81 :4644
- [9] 黄庆安.硅微机械加工技术.北京:科学出版社,1996.161
[Huang Q A. Microprocess of Silicon Micro Machine. Beijing: Science Press, 1996. 161 (in Chinese)]
- [10] 周斌等.原子能科学与技术,1996,30(1):8 [Zhou B *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 1996, 30 (1) : 8 (in Chinese)]

• 物理新闻 •

用于花斑甲虫的图林模型 (Turing Model for Ladybug Beetle Pattern)

天才的数学家 A. 图林曾经用数学模型来复制若干动物身上呈现出的复杂交错的斑图,如斑马、花豹和长颈鹿.这些模型是以扩散方程为基础,它经常描述各种物质随时间自发混合的过程.这种模型称为图林模型.数学家与物理学家常常利用图林模型来模拟在二维平面上所形成的生物体上的斑图.但实际情况是,除了身体足够长的动物外,基本上不能将动物表面看成是平面的.

虽然图林模型在简化的假设下也能较好地模拟出虎背上的条纹和猎豹身上的彩色斑点,但现在台湾国立清华大学的科学家 S.S. 梁和他的同事们决定研究更复杂一些的斑图,他们将图林模型推广到部分球面上,所得到的斑图令人想起呈现在花斑甲虫背上的图案.生物学告诉我们,地球上存在着 4500 多种不同的花斑甲虫,但其中多数都具有独特的、很易识别的标记,即由红色与黑色这两种对比色构成的图案.

利用调节方程中的参数和改变化合物设定的初条件(这些化合物是为了能产生各种颜色而设定的),S.S. 梁等得到了各式各样装饰在这类昆虫身上的条纹、漩涡和斑点.新的模型显示,一种动物的特殊几何结构会对它在确定其花纹装饰时起重要作用.在图林关于扩散是潜在机制的基础上加上几何因素后将会有助于重现出在大自然中存在的美丽斑图.

(云中客摘自 Physical Review E, October 2001)