

# Design and Practice of Project-Based Chemistry Experiment Teaching—Construction of Experimental Thinking Model with Wet Etching of Copper and Silicon as an Example

Yaping Shi<sup>1</sup> Hepei Jiang<sup>2</sup>

1. Xiamen Foreign Language School, Xiamen, Fujian, 361000, China

2. Xiamen Academy of Educational Sciences, Xiamen Fujian, 361000, China

## Abstract

Under the innovation-driven strategy, chemistry experiment teaching is no longer confined to traditional knowledge imparting and skill training. By integrating project-based learning, it stimulates students' interest and cultivates their innovative thinking and problem-solving abilities. This project focuses on the wet etching of copper and silicon, explores reagent selection, reaction mechanisms, and condition control, and constructs a chemical experimental thinking model. The project helps students deepen their understanding of chemistry, enhance their experimental thinking, problem-solving, and engineering practice capabilities, and perceive the social value of chemical experiments.

## Keywords

project-based experimental teaching; construction of experimental thinking model; wet etching process

# 项目式化学实验教学的设计与实践——以铜硅湿法刻蚀为例的实验思维模型构建

施雅萍<sup>1</sup> 江合佩<sup>2</sup>

1. 厦门外国语学校, 中国·福建 厦门 361000

2. 厦门市教育科学研究院, 中国·福建 厦门 361000

## 摘要

在创新驱动战略下, 化学实验教学不再局限于传统的知识传授和技能训练, 融入项目式学习, 激发学生兴趣, 培养创新思维与问题解决力。本项目聚焦铜、硅的湿法刻蚀, 探讨试剂选择、机理及条件调控, 构建化学实验思维模型。本项目促进学生深化化学理解, 提升实验思维、问题解决及工程实践能力, 感受化学实验的社会价值。

## 关键词

项目式实验教学; 实验思维模型建构; 湿法刻蚀工艺

## 1 引言

化学实验教学作为培养综合素质与创新思维的关键环节, 在新课标及教育政策的推动下, 正经历着深刻的变革。针对当前实验教学常陷模式僵化、内容局限、学生被动模仿等问题<sup>[1]</sup>, 《普通高中化学课程标准(2017年版)》及相关政策文件明确提出了通过真实情境下的多样化探究活动、精心设计实验等要求, 旨在促进学生实验技能与思维能力的深度发展<sup>[2]</sup>。响应此号召, 项目式化学实验教学应运而生, 以学生为中心, 围绕具体项目展开, 涵盖选题、设计、操作、

分析及成果展示等全过程, 实现了知识与实践的深度融合<sup>[3]</sup>。在此模式下, 学生成为主动探索者, 通过解决真实问题, 不仅掌握了实验技能, 更激发了探究兴趣, 培养了创新思维与实践能力<sup>[4]</sup>。

## 2 项目主题选择

在设计这一项目式化学实验教学案例时, 我们精心选取了铜、硅元素的湿法刻蚀工艺作为核心情境素材, 旨在通过其独特的趣味性、挑战性和复杂性, 为经历高三一轮复习的学生提供一次意义非凡的实验探索之旅。

湿法蚀刻工艺复杂精细, 涵盖刻蚀液配方、速率控制、表面平整度及产物处理。本课简化工艺, 保留核心要素与原理, 引导学生探索刻蚀铜的化学反应热力学、动力学问题,

【作者简介】施雅萍(1998-), 女, 中国福建厦门人, 本科, 二级, 从事化学教学、德育研究。

并转化为实验问题。同时，深入挖掘硅刻蚀的独特工艺，如各向异性刻蚀、掩模制备，展现化学世界的复杂精妙，提升学生实践与理论结合能力。

本项目构建了一个系统化、多层次的实验设计思维模型，涵盖三个核心维度（见图1），为同学们开展实验设计提供有力支撑。



图1 基于项目式学习的实验思维三维模型

### 3 项目教学目标

在进入《铜与硅湿法刻蚀的深度探索》项目之前，学生已初步具备电负性等概念知识、基本的实验操作技能、价类二维视角、热力学-动力学综合视角等，这为他们从更深层次理解刻蚀过程中的能量变化、反应速率及机理提供了有力支持。在高三复习阶段，如何融合多板块知识去“设计-评价-优化”铜与硅的湿法刻蚀实验？故本项目从真实复杂的刻蚀工艺中抽提化学问题，设置如下具体学习目标：

- (1) 能从“价类二维”角度选择刻蚀铜的试剂，探究铜的刻蚀实验并评价刻蚀效果，从热力学-动力学视角分析并优化刻蚀效果，初步建构实验思维模型。
- (2) 能应用模型选择硅的刻蚀试剂并评价，利用“电负性”分析反应机理，利用“速率方程”分析影响反应速率因素，优化刻蚀液并完善实验思维模型。
- (3) 能应用模型分析硅的各向异性刻蚀，从结构与能量视角分析硅与 KOH 溶液反应机理，建构实验思维模型，

了解中国在芯片领域的成就。

### 4 项目任务与流程

基于项目式教学框架，本研究通过“铜刻蚀模型初建→硅刻蚀模型迁移→芯片工艺应用”三阶段任务链，实现思维模型的螺旋式建构（见图2）。首先，以铜湿法刻蚀实验为切入点，通过设计、实施、分析与评价优化三轮实验，初步构建实验思维模型，加深学生对化学原理的理解，锻炼实验设计与分析能力。

接着项目转向硅湿法刻蚀的深入探索，鼓励学生应用已构建的模型，结合资料深入分析硅刻蚀过程中的复杂现象，特别是各向异性刻蚀的独特性。通过实践与理论的紧密结合，学生进一步完善实验思维模型，深化对化学反应机理的认识。

最后引导学生将所学知识与中国芯片制造的实际成就相结合，这一环节不仅增强了学生的民族自豪感，还激发了探索未知、服务社会的科研热情。

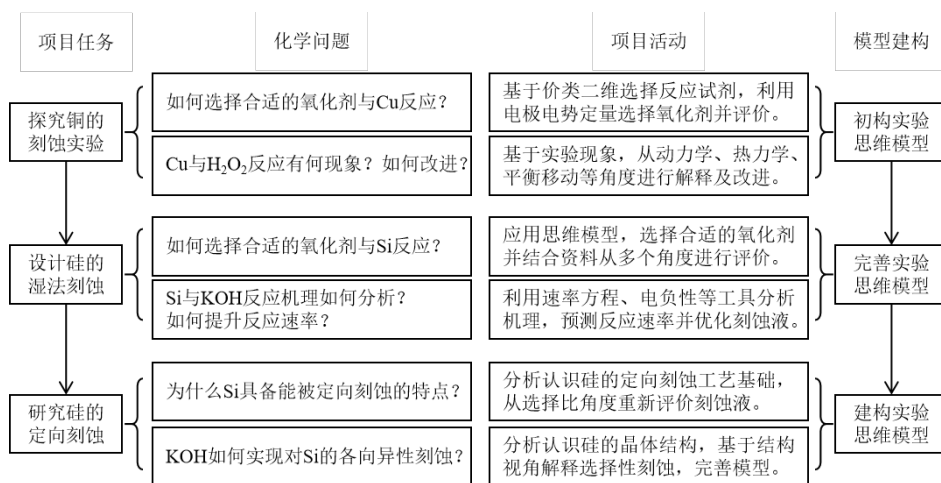


图2 项目整体教学流程图

### 4.1 设计铜的刻蚀实验 初构实验思维模型

以设计铜的湿法刻蚀方案为目的，不断以驱动问题帮助学生推进任务，第一轮实验(见表1)引导学生沿“明确目标—试剂选择—设计方案—优化评价”的思路，初步搭建设计实验思维框架，深化对湿法刻蚀技术的理解和应用能力。

通过分析 Cu 与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液反应异常现象的原因(图3)，

开启第二轮探究实验(表3)。

前两轮实验注重锻炼学生的思维分析、定性观察分析现象能力，在第三轮实验分析时注重提升学生定量分析能力，故由老师提出异常现象：用铜片在 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、氨水溶液中反应静置 20 分钟后表面附着淡蓝色沉淀，给予相关数据计算分析并引导学生基于反应原理进行改进。

表 1 第一轮设计实验教学过程

教学环节	学生活动	活动结果
明确目标	思考如何快速制作铜线路版	机器刻蚀、利用化学反应刻蚀
选择试剂	分析铜去除的化学转化路径	将金属铜氧化为可溶性 Cu <sup>2+</sup>
	利用价类二维图分析 Cu 转化为 Cu <sup>2+</sup> 需选用试剂	选用氧化剂
设计方案	利用电极电势数据选择合适的氧化剂	多数同学能够选择氧化性大于 Cu <sup>2+</sup> 的试剂；个别同学基于绿色化学角度排除 HNO <sub>3</sub> 溶液。
	设计实验对比 Cu 分别与 FeCl <sub>3</sub> 溶液和 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 溶液反应效果	多数同学能够控制单一变量，具体写出试剂浓度、用量，或有等量、等浓度描述。
	预测并观察对比反应现象	Cu 与 FeCl <sub>3</sub> 溶液反应由淡黄色变为淡蓝色，与预测吻合；Cu 与 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 溶液反应无明显颜色现象，与预测不吻合。
	分析 Cu 与 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 溶液反应异常现象的原因	提出三种猜想： ① Cu 与 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 溶液未发生反应，该反应需大量 H <sup>+</sup> 参与； ② Cu 与 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 溶液能发生反应，由于速率慢暂无明显现象； ③ Cu 与 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 溶液能发生反应，由于反应进行程度小暂无现象。

[探究二]探究铜与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 反应异常现象

异常现象原因分析	$Cu + H_2O_2 + 2H^+ = Cu^{2+} + 2H_2O$
实验设计	Cu 与 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 反应，滴稀 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
实验现象	无现象，有气泡产生
实验结论	

[探究二]探究铜与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 反应异常现象

异常现象原因分析	$Cu + H_2O_2 + 2H^+ = Cu^{2+} + 2H_2O$
实验设计	$Cu + H_2O_2 + H_2SO_4$ / $Cu + H_2O_2 + 氨水$
实验现象	黑色沉淀 / 由无色→淡蓝色→深蓝色
实验结论	Cu 与 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 反应无现象，由于反应程度低

[探究二]探究铜与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 反应异常现象

异常现象原因分析	$Cu + H_2O_2 + H^+ = Cu^{2+} + H_2O$ 反应需 H <sup>+</sup> 参与
实验设计	在 Cu 与 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 反应基础上，滴加稀 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
实验现象	溶液变为淡蓝色，并有大量气泡产生
实验结论	Cu 与 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 反应无现象，有反应发生(猜想二原因)

[探究二]探究铜与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 反应异常现象

异常现象原因分析	$Cu + H_2O_2 + 2H^+ = Cu^{2+} + 2H_2O$ 反应速率较慢， $[Cu^{2+}]$ 浓度低，无明显现象。→ FeCl <sub>3</sub> 催化，S 影响反应速率
实验设计	$Cu + 2H_2O_2$ / $Cu + 1mol/L H_2O_2$ / $Cu + 1mol/L H_2O_2$
实验现象	无明显现象 / 气泡 / 带火星木条靠近，棉签为 O <sub>2</sub>
实验结论	Cu 与 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 反应无明显现象，不是由于速率慢引起的

图 3 学生在学案上的分析与设计过程

表 3 第二轮设计实验教学过程

教学环节	学生活动	活动结果
设计方案	设计实验(见图3) 验证上述猜想	小组讨论设计方案并到讲台领取所需试剂：小木条、酒精灯、热水壶、2mol/L 氨水、H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 、Na <sub>2</sub> S 溶液。
预测与观察现象(见图4)		
针对猜想①： Cu 与 1ml1mol/LH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 溶液，并滴加 1ml2mol/LH <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 溶液，溶液变为淡蓝色并有细小气泡产生，经检验为 O <sub>2</sub> ；	针对猜想②： Cu 与 1ml2mol/LH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 溶液反应，无明显现象； Cu 与 1ml1mol/LH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 溶液并水浴加热，产生大量气泡，经检验为 O <sub>2</sub> ；	针对猜想③： Cu 与 1ml1mol/LH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 溶液，并滴加 1ml2mol/L 氨水，溶液变为深蓝色，产生气泡，经检验为 O <sub>2</sub> ；改滴加 1ml2mol/LNa <sub>2</sub> S 溶液，红色固体表面覆盖变黑。
优化评价	学生分析结论 并基于工艺视角给予评价	Cu 与 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 溶液无现象与 H <sup>+</sup> 浓度、进行程度低有关；H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 分解产生 O <sub>2</sub> 导致试剂损耗。

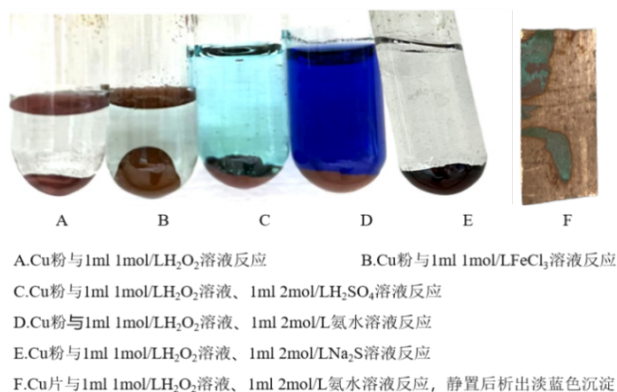
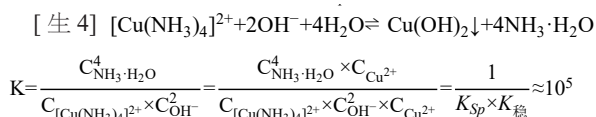
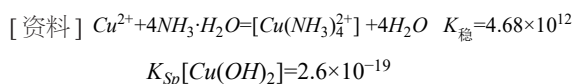


图4 探究铜的刻蚀实验的一些现象

【第三轮实验】由老师提出异常现象：用铜片在 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、氨水溶液中反应静置 20 分钟后表面附着淡蓝色沉淀，给予相关数据计算分析并引导学生基于反应原理进行改进。部分教学过程如下：

[师]请大家思考并写出该过程的离子方程式，并结合数据说明蓝色沉淀生成的原因。



K 值接近 10<sup>5</sup>，说明反应进行趋势大，易生成 Cu(OH)<sub>2</sub> 蓝色沉淀。

[师]有沉淀附着会影响覆铜板的性能，如何针对这个情况进行改进呢？

[生5]Cu(OH)<sub>2</sub> 的氢氧根来自氨水的电离，加入 NH<sup>4+</sup> 抑制氨水电离。

[师]实际生产中加入 NH<sub>4</sub>Cl 溶液进行调节。

#### 4.2 研究硅的湿法刻蚀，完善实验思维模型

在深入探索硅的湿法刻蚀领域时，我们鼓励学生运用先前环节精心构建的实验思维模型作为导航灯塔，学生能够沿着模型对相对陌生的材料硅有条不紊地进行研究。此外查阅到芯片刻蚀液、刻蚀原理、刻蚀条件等资料，本环节教学中主要引导学生运用模型进行深刻分析并解决工艺问题。部分教学过程如下：

[师]查询到其刻蚀机理示意图（图5）及速率方程，从动力学角度分析，体系中谁对硅的刻蚀速率影响最大？

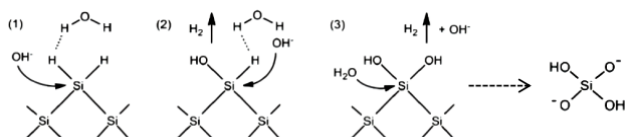


图5 Si 与 KOH 溶液反应机理示意图<sup>[5]</sup>

[生6]水分子影响最大，因为速率方程里它是四次方。

[师]对于固液反应，反应物分子需经历“吸附-反应-脱附”。我们从机理中可以看到，水分子先吸附到硅的表面，OH<sup>-</sup> 进攻 Si，从电性的角度分析这步过程。

[生6]Si 的电负性小于 H，Si 偏正电性，H 偏负电性，水中偏正电性的 H 与 Si 上偏负电性 H 互相吸引，然后形成 H<sub>2</sub> 逸出，同理，溶液中 OH<sup>-</sup> 进攻 Si。

[师]刻蚀过程中，科学家们发现如果产生的 H<sub>2</sub> 在硅表面停留太久，不仅让刻蚀面坑坑洼洼，还非常影响速率<sup>[6]</sup>，让水和 OH<sup>-</sup> 没办法吸附到活性位点，有什么办法能让氢气尽快脱附？

[生7]可以搅拌把氢气带离体系。

[师]工业上通过添加一种物质来带离氢气，你猜测该物质应具有什么特性？

[生7]挥发性。

[师]工业上选择添加异丙醇将生成的氢气脱附离开<sup>[7]</sup>。

#### 4.3 分析硅的定向刻蚀，建构实验思维模型

在深化硅湿法刻蚀研究的进程中，我们将依托先前构建的实验思维模型，集中探讨两大核心议题：“在单晶硅基底上实现精确图案化刻蚀的策略是什么？以及晶体硅何以展现出多样化的刻蚀表面形貌，其背后的机制是什么？”引导学生从能量状态和晶体结构两个核心维度，对硅材料的各向异性特征进行更为深刻的理解与重构，目标是帮助学生建立一个更加严谨、完善的实验思维模型，以应对更复杂问题的分析与解决。鉴于该部分知识的抽象性，课堂上提供“资料卡片”支撑并配合教师讲解，作为学生分析过程中的重要辅助工具。

### 5 设计实施“教学评”一体化设计

“教-学-评”一体化设计旨在将教学目标、教学活动与评价体系紧密结合，形成一个相互促进、共同发展的整体。结合本节实验的教学目标，以学生在实验设计中“明确目标”、“选择试剂”、“设计方案”、“优化评价”这四个环节为课堂重点观察环节，根据学生表现打 1~3 分。例如：设计方案时，学生直接套用教材方案，未体现变量控制或异常预判为 1 分，设计对比实验并控制主要变量，能预判部分现象但缺乏定量工具支持为 2 分，运用控制变量法设计多组实验，预判异常现象并制定检测方案，结合速率方程 / 平衡常数定量验证为 3 分。通过观察评价学生的能力水平，以评价促进学习、优化教学，从而实现教学质量的持续提升。

### 6 项目教学反思

本项目探索项目化化学实验教学，通过复杂情境设计激发学习热情与创造力，反思理想实验与工业应用融合的重要性，并强化实验思维训练，同时思考如何全面培养学生科学素养与责任感。

#### 6.1 复杂情境进阶：项目化学激发创造热情

本项目化实验教学通过精心遴选具有挑战性的复杂情

境,并对其进行系统化、进阶化的提炼与设计,有效规避了传统实验教学的单一与枯燥,还促使他们在解决复杂问题的过程中不断挑战自我,从而极大地激发了学习热情与内在动力。同时,情境的进阶设计鼓励学生从基础技能向高级思维过渡,促进了创造性思维的萌发与成长<sup>[8]</sup>。

### 6.2 项目式教学的双重价值:模型建构与工程思维培养

依托“铜→硅”这一递进式素材体系,推动学生思维从“单一反应解析”向“复杂工艺拆解”实现跨越式提升。在模型构建过程中,系统整合热力学、动力学及晶体结构等核心知识模块,形成立体化认知框架。项目化化学实验教学实践表明,实验价值的呈现具有多维特征,尤其需要重视理想实验与工业转化的协同设计对提升学生综合素养的关键作用,强化实验内容与实际生产需求的关联性,构建问题解决能力培育体系。

### 6.3 反应原理与绿色化学:项目化学教学双重视角

本项目在化学实验教学设计上,加强对实验思维深广度的训练,通过设计综合性强、逻辑严密的实验项目,有效促进了学生批判性思维、系统思维及创新思维的发展。因此,更应通过多课时围绕化学实验做层层递进的大单元设计,培养学生的社会责任感<sup>[9]</sup>。

### 参考文献

- [1] 廖群英.高中化学实验教学现状及审思[J].中学化学教学参考,2024,(32):40-42.
- [2] 张勇刚.对“素养为本”化学实验教学的探索与思考[J].中学化学教学参考,2024,(20):34-37.
- [3] 冯存良.基于项目式学习的高中化学实验教学设计与实践[J].中学化学教学参考,2024,(12):38-41.
- [4] 陈懿,陈静.高中化学项目化学习设计的实践和探索[J].化学教学,2022,(01):27-32.
- [5] 杨弢,朱志江.高中化学实验教学的目标任务和方法路径[J].化学教学,2024,(01):33-36.
- [6] Seidel H,Csepregi L,Heuberger A, et al.Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions:I.Orientation Dependence and Behavior of Passivation Layers[J].Journal of The Electrochemical Society,2019,137(11):3612-3612.
- [7] 姚明秋,唐彬,苏伟.单晶硅各向异性湿法刻蚀的形貌控制[J].光学精密工程,2016,24(02):350-357.
- [8] 张凯,顾豪爽,胡光,等.MEMS中硅的深度湿法刻蚀研究[J].湖北大学学报(自然科学版),2007,(03):255-257.
- [9] 张丽华.学科核心素养视阈下的实验课教学策略[J].中学化学教学参考,2024,(15):43-45.