



情报杂志
Journal of Intelligence
ISSN 1002-1965, CN 61-1167/G3

《情报杂志》网络首发论文

题目： 基于“突变—演化”模型的颠覆性技术识别方法及应用——以集成电路材料为例

作者： 熊焰，张凌恺，陈旭，江瑶

网络首发日期： 2023-09-15

引用格式： 熊焰，张凌恺，陈旭，江瑶. 基于“突变—演化”模型的颠覆性技术识别方法及应用——以集成电路材料为例[J/OL]. 情报杂志.
<https://link.cnki.net/urlid/61.1167.G3.20230914.1455.022>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于“突变—演化”模型的颠覆性技术 识别方法及应用*

—以集成电路材料为例

熊焰¹ 张凌恺¹ 陈旭¹ 江瑶²

(1. 上海应用技术大学经济与管理学院 上海 201418;

2. 上海工程技术大学管理学院 上海 201620)

摘要: [研究目的] 瞄准世界科技前沿,有效识别并前瞻布局颠覆性技术,已成为我国塑造未来竞争新优势,实现高水平科技自立自强的关键。[研究方法] 从颠覆性技术的突变特征与演化路径出发,构建“突变—演化”模型;再计算技术突变值与技术演化值,识别出候选颠覆性技术;最后对比现有研究,并参考专家意见和行业报告,验证模型的有效性,筛选出颠覆性技术。[研究结论] 以集成电路材料专利数据为样本,识别出“光刻胶”“非硅基衬底材料”和“封装材料”等主题是集成电路材料颠覆性技术的重点方向,与目前集成电路材料产业发展现状相一致,验证了“突变—演化”颠覆性技术识别模型的科学性及有效性。

关键词: 颠覆性技术;“突变—演化”模型;技术识别;集成电路材料;专利分析;指标体系;突变理论

中图分类号: G353.1

Disruptive Technology Identification Method and Application Based on the "Mutation-Evolution" Model: A Case Study of the Integrated Circuit Material

Xiong Yan¹ Zhang Lingkai¹ Chen Xu¹ Jiang Yao²

(1. School of Economics & Management, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418;

2. School of Management, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620)

Abstract: [Research purpose] Aiming at the forefront of world technology, effective identifying and foreseeing disruptive technologies has become the key for our country to shape new advantages in future competition and achieve high-level technological self-reliance. [Research method] Starting from the disruptive technological mutation characteristics and evolutionary paths, we construct a "mutation-evolution" model. Then, we calculate the technological mutation value and technological evolution value to identify potential disruptive technologies. Finally, comparing with existing research and considering expert opinions and industry reports, we validate the effectiveness of our model and select disruptive technologies. [Research conclusion] Using integrated circuit material patent data as a sample, we identify "photoresist", "non-silicon-based substrate materials" and "packaging materials" as key directions for disruptive technologies in integrated circuit materials. This is consistent with the current development status of the integrated circuit material industry, confirming the scientific property and effectiveness of the "mutation-evolution" model for identifying disruptive technologies.

Key words: disruptive technology; Mutation-Evolution model; technology identification; integrated circuit materials; patent analysis; in-

基金项目:国家自然科学基金项目“国际学习对制造企业国际化速度的作用机制与时空效应研究”(编号:71974130);上海市2023年度“科技创新行动计划”软科学研究项目“面向上海未来产业培育的颠覆性技术识别及突破路径研究”(编号:23692123100);上海市青年科技英才扬帆计划项目“上海融合性数字产业‘卡脖子’技术甄选机制与攻关路径研究”(编号:21YF1415900)研究成果。

作者简介:熊焰,男,1974年生,博士,教授,院长,研究方向:技术创新与知识产权管理;张凌恺,男,1994年生,硕士研究生,研究方向:技术创新与知识产权管理;陈旭,男,1990年生,博士,讲师,研究方向:技术创新管理;江瑶,女,1992年生,博士,副教授,研究方向:科技情报分析。

通讯作者:陈旭

0 引言

颠覆性技术可以重设前沿技术路径,重构科技竞争格局^[1]。识别颠覆性技术,提前把握前沿科技发展方向,是国家实现“换道超车”的重要机会窗口^[2]。现有研究关于颠覆性技术识别方法主要分为两类:一是技术预测法,如采用物种入侵模型^[3]、Fisher-Pry 模型^[4]等来衡量信号强度^[5]、发展潜力^[6]等特征,以预测技术的颠覆时机,这类识别方法常将主题热度等同于技术颠覆,而忽略对技术影响的评估;二是市场分析法,如采用消费者需求模型^[7]、视觉模拟量表^[8]等来评价颠覆作用的影响,这类识别方法受限于技术评估清单的来源,而忽视初期信号弱的技术。究其本质,上述研究方法在操作过程中未能全面把握颠覆性技术演进过程中的突变和演化规律,从而导致识别精度不高^[9]。因此,本文基于颠覆性技术突变和演化视角,构建颠覆性技术“突变—演化”模型,形成一套操作性强、识别精准的颠覆性技术定量识别方法,并选取集成电路材

料领域技术为应用案例,对模型的科学性和实用性加以验证,批量形成该领域颠覆性技术主题。

1 基于“突变—演化”的颠覆性技术识别模型构建

“颠覆性技术”一词最早由 Christensen 提出,是指从低端市场切入,不断迭代,直至替代主流技术,形成新的市场格局与技术体系^[10],其具有突变性和演化性双重属性^[11]。基于此,本文尝试从突变与演化的视角出发,构建“突变—演化”模型,以实现颠覆性技术的精准识别(见图1)。具体包括:首先,在构建颠覆性技术突变模型时,从颠覆性技术演进特征入手,设计特征指标体系并匹配突变模型,通过熵值法确定指标权重,计算出技术突变值;其次,在构建颠覆性技术演化模型时,结合技术主题发展态势,选取各大技术主题的关键词进行聚类,通过分析技术演化路径得出技术演化值;最后,映射候选颠覆性技术到坐标系中,用政策报告等专业权威信息对比验证,识别出颠覆性技术。

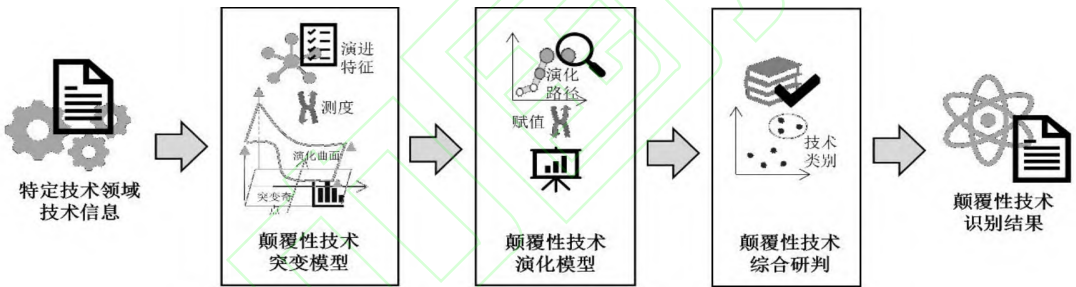


图1 研究设计

1.1 颠覆性技术突变模型构建

为了有效测度技术突变性,本文基于突变理论构建颠覆性技术突变模型。突变模型是建立在突变理论基础上的数理模型,可量化分析技术特征指标,已有研究使用突变模型来评估技术颠覆潜力^[13]、识别技术机会^[14]等,但现有突变模型需要依靠专家意见选定可计算的特征,客观性不足且容易忽略技术演进的重要特征。基于此,本文从演进特征界定、指标体系设计等方面改进突变模型,实现颠覆性技术突变值的计算。

1.1.1 演进特征界定

与常规技术的演进范式不同,颠覆性技术演进过程具有三大典型特征:一是初期影响力小,颠覆性技术识别最困难的阶段是在于技术初期,因为在技术初期信号弱,技术轨迹具有“不确定性”^[15],外界对其关注度较低,但在技术演进中积极融合与扩张^[16]。二是交叉耦合度好,颠覆性技术在发展过程中会根据政策、产业等需要不断促进学科交叉与技术融合^[9],并改变自身的技术形态,发生“突变”并等待颠覆时机^[17],具有

“强适应性”^[18]。三是技术涵盖面广,颠覆性技术在“突变”后,会替代主流技术^[19],产生巨大影响,重新打造了一套涵盖多种学科技术的技术格局和产品体系^[20],见图2。

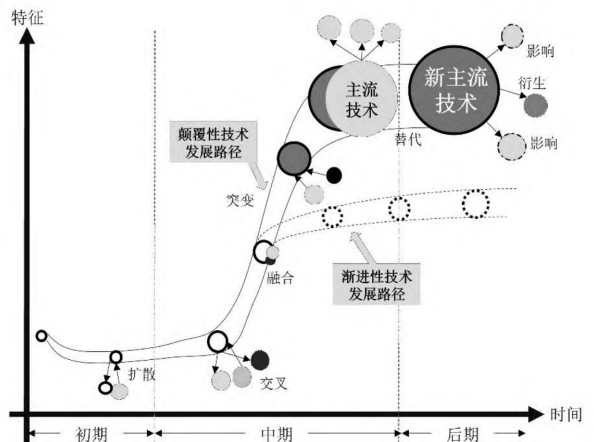


图2 颠覆性技术演进过程

1.1.2 指标体系设计

基于颠覆性技术演进特征,以专利表征技术方式,

从初期影响力 (T1)、交叉耦合度 (T2)、技术涵盖面 (T3) 三个维度出发,设计颠覆性技术突变值测度指标体系。具体如下:

第一,初期影响力 (T1)。初期影响力主要从即时信号强度、前向引用均值和初期扩张速率三个维度来表征颠覆性技术初期“信号弱、关注度低、扩张积极”的特点^[20];①即时信号强度 TII 侧重于测量技术主题在特定时间跨度内对外界释放信号的强度^[20],颠覆性技术初期信号弱,故 TII 为负向指标;②前向引用均值 TAC 侧重于说明外界在特定时间跨度内对技术主题的关注度。颠覆性技术常被视为“边缘创新^[21]”“离群专利^[22]”,所以技术初期很少被关注,故 TAC 为负向指标;③初期扩张速率 TER 侧重于说明在特定时间跨度内技术类别横向扩张的速率^[18],颠覆性技术无论在演化的任何阶段,都有较强的扩张势头。

第二,交叉耦合度 (T2)。交叉耦合度主要从类别相似程度和分布均匀程度两个维度来表征颠覆性技术“适应性好、交叉耦合好”的特点^[20];①类别相似程度

TAD 代表技术主题内不同技术方向间的平均距离,用技术间的相似程度来表征技术主题内各类技术的耦合情况;②分布均匀程度 TGC 使用“基尼系数”来反映技术主题下各类技术交叉的情况。

第三,技术涵盖面 (T3)。技术涵盖面主要从技术多样程度、科学关联指数、学科覆盖比率和引用分布指数四个维度来表征颠覆性技术“影响力大”的特点^[11]:①技术多样程度 TAN 表示技术主题内不同技术类别平均数目,反映技术类别多样化程度^[16];②科学关联指数 TSR 的值越大,表明技术主题包含的科技文献数量越多,影响的科学研究越多^[18];③学科覆盖比率 TCR 的值越大,表明技术主题涉及的技术类别越多,影响的学科覆盖面越广^[18];④引用分布指数 TCD 的值越大,表明技术主题的前向引用专利所属的技术类别数量越多,后续影响范围越大。

基于上述分析,本文构建出颠覆性技术突变值测度指标体系,具体指标构成及计算方法如表 1 所示。

表 1 颠覆性技术突变值测度指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	计算公式	说明
初期影响力 T1	即时信号强度 TII		$TII = \left(\sum_{k=1,4,7} \left(\frac{\sum_{l=k}^{k+2} Nc_l}{\sum_{l=k} N_l} \right) \right) / Y$	N_k 为第 k 年专利公开的数量, $k = (1, 4, 7)$; Nc_k 为第 k 年公开的专利被其它专利引用的次数; Y 为时间跨度
	前向引用均值 TAC		$TAC = \left(\sum_{k=1}^Y Nc_k \right) / 10 * Q$	Q 为技术领域所有专利的数量
	初期扩张速率 TER		$TER = \frac{\sum_{k=2}^Y (Pn_k - Pn_{k-1})}{Y}$	Pn_k 为第 k 年公开专利的 IPC 小类总数, $k = (2, \dots, Y)$
技术突变值 T	交叉耦合度 T2	类别相似程度 TAD	$TAD = \frac{(1 - R_{lk}) * 100}{Y * q}$ $R_{lk} = \frac{1}{1 + \sqrt{\left(\sum_{l \neq k} (x_l - y_k)^2 \right)}}$	参考欧几里德距离计算公式, 设定 R_{lk} 为 IPC 小类类别 l 和 k 的相似度, q 是技术 IPC 小类类别总数, x_k, y_k 为 IPC 小类类别 k 的专利数量
		分布均匀程度 TGC	$TGC = \frac{\sum (2k - q - 1) m_k}{N * q \sum m_k}$	k 为序列指标, m_k 为属于第 k 个 IPC 小类专利的数量, 类别依据 m_k 由大到小排列, N 为技术主题总数
	技术多样程度 TAN		$TAN = \frac{q}{Q}$	Q 为该技术领域所有专利的数量
技术涵盖面 T3	科学关联指数 TSR		$TSR = \left(\sum_{k=1}^Q C_k \right) / (C * Y)$	C_k 为专利 k 引用科学文献的数量
	学科覆盖比率 TCR		$TCR = \sum_{k=1}^Y Pn_k / Q$	Pn_k 为第 k 年公开专利对应的 IPC 小类类别总数, $k = (1, 2, \dots, Y)$
	引用分布指数 TCD		$TCD = \frac{P(Cite)}{q}$	$P(Cite)$ 为前向引用专利技术类别总数

1.1.3 颠覆性技术突变值计算

颠覆性技术演进中可匹配突变现象的“多模态”“不可达”及“发散”等特征^[23]。突变模型实质上是根

据指标数量确定模型的归一化公式,再结合已构建的指标体系层层向上,最终得到技术突变值^[24]。主要突变模型及对应的势函数、归一化方程,可参见表 2。

表2 不同突变类型对应的突变模型

突变类型	尖点突变模型	燕尾突变模型	蝴蝶突变模型
底层指标个数	2	3	4
权重排序	$W_a > W_b$	$W_a > W_b > W_c$	$W_a > W_b > W_c > W_d$
势函数	$f(x) = x^4 + ax^2 + bx$	$f(x) = \frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{3}ax^3 + \frac{1}{2}bx^2 + cx$	$f(x) = \frac{1}{6}x^6 + \frac{1}{4}ax^4 + \frac{1}{3}bx^3 + \frac{1}{2}cx^2 + dx$
归一化方程	$x_a = \sqrt{a}; x_b = \sqrt[3]{b}$	$x_a = \sqrt{a}; x_b = \sqrt[3]{b}; x_c = \sqrt[4]{c}$	$x_a = \sqrt{a}; x_b = \sqrt[3]{b}; x_c = \sqrt[4]{c}; x_d = \sqrt[4]{d}$

本文采用熵权法确定指标权重。熵权法在计算的过程中没有主观的因素,若某指标的熵值越小,则表明该指标权重越大^[25]。技术特征各子指标在突变模型势函数中的排列顺序由其对应的权重确定,某一子指标权重越大,则该子指标被开方的次数越少,由此可得到各子指标的分值^[13]。具体步骤如下:首先,根据底层指标个数确定突变级数模型,如底层指标个数为3时,选择燕尾突变模型,势函数为: $f(x) = \frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{3}ax^3 + \frac{1}{2}bx^2 + cx$,其中同一层指标根据权重大小按序排列,若 $W_a > W_b > W_c$,则同一层指标的左右顺序为a、b、c。其次,推导归一化方程,如底层指标个数为3时,燕尾突变模型的归一化方程为: $x_a = \sqrt{a}; x_b = \sqrt[3]{b}; x_c = \sqrt[4]{c}$ 。再次,判断指标相关性,基于多目标决策理论,若底层指标之间呈强相关关系,则按“互补准则”,取其平均数为上层指标的结果;若底层指标之间呈弱相关关系,则按“非互补准则”的“大中取小”作为上层指标的结果^[13]。最后,计算技术突变值,层层往上推导直至顶层指标。

1.2 颠覆性技术演化模型构建

为了能够客观呈现技术的演化性,本文基于主题演化分析法构建颠覆性技术演化模型。主题演化分析充分考虑技术发展过程性^[26],能展示技术演化过程的特征变化^[9],而现有演化模型无法严格区分颠覆性技术与突变性技术等。基于此,本文在颠覆性技术突变模型基础上,结合颠覆性技术演进特征及“主题挖掘模型”^[4],构建颠覆性技术演化模型,实现技术演化值的计算,见图3。具体过程如下:

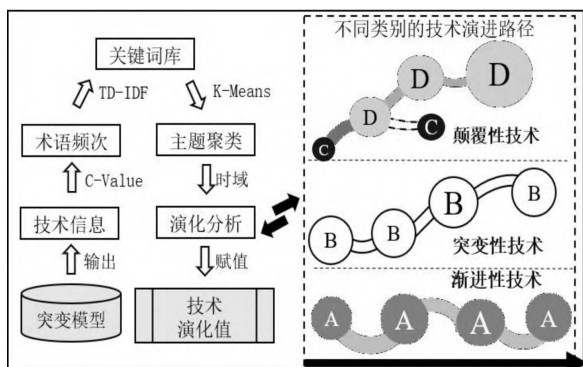


图3 颠覆性技术演化模型

首先,构建技术主题词库,采用C-Value^[27]算法处理数据集,抽取各文献的候选术语,再采用TF-IDF^[28]算法计算术语权重,选定高权重术语作为关键词,结合技术领域知识筛选关键词组成技术主题词库。其次,提取技术主题热点,采用K-Means方法进行聚类,结合关键词的数量和词频进一步融合聚类信息^[28],提取不同时间段的热点关键词。再次,分析技术演化路径,不同类别技术的演化路径相异,渐进性技术的演化呈现为数量的增减,突变性技术的演化呈现为位次的升降,根据本文界定的颠覆性技术演进特征,若某技术有显著的增长趋势,或是由不同的技术演化得出,则可认为该技术具有潜在颠覆性。演化路径中的圆圈大小表示热度增减,圆圈起伏表示当年热度位次高低。最后,计算技术演化值。根据演化路径形态匹配技术类别,识别出匹配技术类别特征的技术点。借鉴李乾瑞等^[16]的方法,若演化路径呈现热度连续递增则赋值1,热度递减赋值-1,技术突现赋值3,技术后续无复现赋值-3,技术扩散赋值3,位次连续增高赋值2,位次降低赋值-2。选取演化路径中表现显著的技术点,分析各技术点赋值结果,标准化处理后按所属技术主题累加,最后得出技术主题演化值。

1.3 基于“突变—演化”模型的颠覆性技术识别

基于突变模型与演化模型的计算结果,本部分将技术突变值及技术演化值映射到平面坐标系中,再根据技术类别特征将各技术主题分类。颠覆性技术兼具“突变显著”^[17]及“演化迅速”^[29]等特点,表现为技术演化值与技术突变值都相对较高;突变性技术突变特征明显,但演化较慢,表现为技术突变值较大而技术演化值较小;渐进性技术表现为两项指标都较小。再经行业技术专家咨询建议,将颠覆性技术判定阈值划分为:技术突变值在0.655~0.955之间,技术演化值在0.155~0.355之间;突变性技术判定阈值划分为:技术突变值在0.655~0.955之间,技术演化值在0.025~0.355之间;渐进性技术判定阈值划分为:技术突变值在0.405~0.605之间,技术演化值在0.025~0.355之间。最终根据技术类别阈值区间在坐标系中将技术主题归类,识别出颠覆性技术。

2 颠覆性技术识别模型应用:以集成电路材料为例

集成电路材料技术的突破是实现器件革新及工艺

升级的前提。但是,当前学术界对集成电路材料领域的研究主要集中在材料的性能提高和应用拓展上,较少去挖掘该领域内潜在的颠覆性技术。因此,本部分以集成电路材料为例,运用“突变—演化”模型去识别该技术领域的颠覆性技术,识别结果将对未来集成电路材料颠覆性技术的前瞻布局具有指导意义。

2.1 专利数据采集

本文借鉴刘云等^[30]的研究方法,首先从文献资料

表3 集成电路材料技术主题分类

序号	主题	编号	技术关键词
1	硅片及硅基衬底材料	A1	硅片、单晶硅、多晶硅、硅晶棒、硅晶圆、绝缘体上硅片(SOI)、结隔离片、抛光片、外延片等
2	非硅基衬底材料	A2	化合物半导体、宽禁带半导体材料、二维材料、蓝宝石、碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)、磷化铟(InP)、砷化镓(GaAs)、石墨烯、碳纳米管、氧化锌(ZnO)、锗、氧化镓(GaO)等
3	光刻胶	A3	G线光刻胶、I线光刻胶、KrF光刻胶、ArF光刻胶、EUV光刻胶、电子束光刻胶、纳米压印光刻胶、大分子自组光刻胶、PCB光刻胶、干膜光刻胶等
4	掩模版	A4	等离子增强化学气相沉积(PECVD)、不透光钼掩模(OMOG)、EUV掩模、掩模基板等
5	抛光材料	A5	研磨液、化学机械抛光(CMP)、抛光垫、抛光机、抛光液、分散剂、电子束蒸发(EBE)等
6	靶材	A6	IOP靶、AZO靶、氧化镁靶、氧化锌靶、铝靶、铜靶、钛靶、钨钛靶等
7	电子特种气体	A7	刻蚀气体(四氟化碳等)、CVD气体(二氯硅烷等)、离子注入气体(六氟化硫等)等
8	工艺化学品	A8	丙二醇甲醚醋酸酯、乳酸乙酯、前驱体化合物、氢氟酸(HF)、二甲基镓(DMG)、二甲基甲酰胺(DMF)、旋涂绝缘介质(SOD)等
9	封装材料	A9	键合丝、引线框架、封装基板、球栅阵列封装(BGA)、裸芯片封装(CSP)等

注:小括号中内容为各技术主题的专有名词缩写,加入到检索策略中会使数据更准确;每个子领域的检索策略中还包含“集成电路材料”“半导体材料”等通用关键词。

本文以 IncoPat 专利数据库的公开专利为基础,考虑到专利数据的完整性,设定时间检索区间为 2014 年 1 月 1 日到 2022 年 12 月 31 日,检索日期为 2023 年 4 月 1 日,结合前文的技术主题分类进行专利检索。通过人工去噪后,初步检索得到九大技术主题的专利共计 85 358 项,经数据清洗与处理后,共获得有效专利 52 676 项。

2.2 技术突变值计算结果

根据表 1 中的计算公式,分别计算 9 个集成电路

中提取集成电路材料技术主题,初步建立技术分类体系;其次,参考《集成电路产业全书》、《“十四五”原材料工业发展规划》等资料制定各技术主题的专利检索策略;最后,建立集成电路材料主题分类标准,包括硅片及硅基衬底材料、非硅基衬底材料、光刻胶、掩模版、抛光材料、靶材、电子特种气体、工艺化学品以及封装材料 9 类,见表 3。

材料技术主题的技术特征指标值,标准化处理后结果如表 4 所示。其中,在计算 TAD 时,由于每个技术主题内所含的 IPC 主分类号小类数量不一,需要选取每个技术主题下 IPC 小类专利数量排名靠前的 10 个小类进行类别相似度测算。在计算 TCD 时,选取每个技术主题下被引证次数由大到小排名前 500 的专利,检索目标专利的施引专利,计算前向引用专利所包含的 IPC 小类类别总数量。

表4 标准化处理后各主题技术特征指标值

主题 编号	T1			T2		T3			
	TII	TAC	TER	TAD	TGC	TAN	TSR	TCR	TCD
A1	0.561	0.779	1.000	0.177	1.000	0.000	0.031	0.000	0.000
A2	0.918	0.869	0.322	0.094	0.817	0.005	0.404	0.072	0.040
A3	1.000	1.000	0.000	0.576	0.566	0.257	0.066	0.317	0.652
A4	0.623	0.323	0.461	1.000	0.414	0.611	0.584	0.521	1.000
A5	0.863	0.977	0.348	0.480	0.672	0.347	0.000	0.277	0.333
A6	0.686	0.647	0.378	0.000	0.383	0.231	0.328	0.318	0.459
A7	0.961	0.872	0.266	0.313	0.372	0.209	1.000	0.319	0.453
A8	0.848	0.965	0.539	0.293	0.000	1.000	0.516	1.000	0.990
A9	0.000	0.000	0.350	0.335	0.942	0.012	0.257	0.053	0.077

将各特征指标值代入到颠覆性技术突变模型中,先运用熵权法计算出底层指标权重并排序,再根据归

一化方程及指标相关性求取上层指标值,见表 5。

表 5 演化特征指标权重及突变模型

一级指标	突变模型	二级指标	突变模型	三级指标
技术突变值 T	非互补燕尾突变模型	当期影响力 T1 (0.262)	互补燕尾突变模型	即时信号强度 TII (0.050) 前向引用均值 TAC (0.058) 初期扩张速率 TER (0.078)
		交叉耦合度 T2 (0.405)	互补尖点突变模型	类别相似程度 TAD (0.114) 分布均匀程度 TGC (0.067)
		技术涵盖面 T3 (0.333)	互补蝴蝶突变模型	技术多样程度 TAN (0.202) 科学关联指数 TSR (0.147) 学科覆盖比率 TCR (0.145) 引用分布指数 TCD (0.140)

以“非硅基衬底材料”主题为例,二级指标 T1 包含 3 个三级指标,匹配燕尾突变模型,指标排序为 $TER > TAC > TII$,且指标数据之间有很强的相关性,可以使用“互补原则”,故:

$$T1 = \frac{\sqrt{TER} + \sqrt[3]{TAC} + \sqrt[4]{TII}}{3} = \frac{\sqrt{0.9175} + \sqrt[3]{0.8691} + \sqrt[4]{0.3221}}{3} = 0.834$$

二级指标 T2 包含 2 个三级指标,匹配尖点突变模型,指标排序为 $TAD > TGC$,指标间存在相关性,故:

$$T2 = \frac{\sqrt{TAD} + \sqrt[3]{TGC}}{2} = \frac{\sqrt{0.0943} + \sqrt[3]{0.8168}}{2} = 0.621$$

0.621

二级指标 T3 包含 4 个三级指标,匹配蝴蝶突变模型,指标排序为 $TAN > TSR > TCR > TCD$,指标间存在相关性,故:

$$T3 = \frac{\sqrt{TAN} + \sqrt[3]{TSR} + \sqrt[4]{TCR} + \sqrt[5]{TCD}}{4} = \frac{\sqrt{0.0047} + \sqrt[3]{0.4039} + \sqrt[4]{0.0715} + \sqrt[5]{0.0402}}{4} = 0.463$$

463

一级指标 T 包含 3 个二级指标,匹配燕尾突变模型,指标排序 $T2 > T3 > T1$,因为颠覆性技术在其技术生命周期的不同时间段呈现的特征不一,所以用于表征颠覆性技术阶段性特征的二级指标间无明显相关性,采用“非互补原则”,大中取小,故:

$$T(\text{非硅基衬底材料}) = \min\{\sqrt{T2}, \sqrt[3]{T3}, \sqrt[4]{T1}\} = \min\{\sqrt{0.621}, \sqrt[3]{0.463}, \sqrt[4]{0.834}\} = 0.773$$

按照以上步骤,计算出“非硅基衬底材料”的技术突变值为 0.773,进而计算其他主题的技术突变值,计算结果如图 4 所示,技术突变值越大则圆弧越完整,可得出突变显著的技术主题为:A4(掩模版)、A3(光刻胶)、A5(抛光材料)、A7(电子特种气体)、A2(非硅基衬底材料)。

2.3 技术演化值计算结果

在突变模型数据处理的基础上,本部分按颠覆性技术演化模型的步骤,利用科技文本分析软件 ITGIn-

sight^[31],对 2014-2022 年集成电路材料九大技术主题进行演化分析。

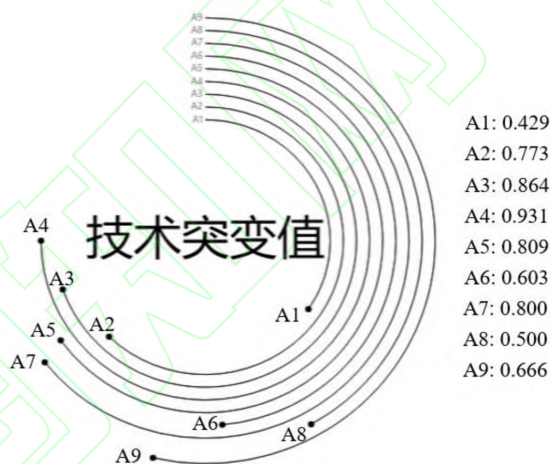


图 4 集成电路材料各主题技术突变值

首先,提取各技术主题专利数据项,设置过滤器、停用词表、字典,经数据清洗生成数据分析文件“.dataset”,再转化为可视化文件“.itgn”。进一步地,分析技术术语,筛选 TF-IDF 相对值大于 0.002 作为技术关键词,并由大到小排列(见表 6),组成集成电路材料技术主题词库。

表 6 集成电路材料技术关键词库

序号	关键词	词频	TF-IDF	C-Value	所属主题
1	复合材料	772	1.000	1544.0	A9
2	光刻胶	523	0.771	826.8	A3
3	等离子体	474	0.632	948.0	A4\A8
4	氮化物	270	0.457	426.4	A2\A4\A7\A9
5	纳米材料	248	0.382	496.0	A2\A3\A9
4	粘合剂	201	0.297	312.2	A9
5	催化剂	172	0.267	270.1	A4\A7
6	钙钛矿	149	0.261	234.6	A2\A8
7	碳化硅	133	0.238	209.2	A2\A4\A9
...
223	双金属	19	0.002	30.1	A9

其次,采用 K-Means 算法对技术关键词进行主题聚类,使用 ITGInsight 软件输出主题趋热情况,可得出近 10 年集成材料领域的技术热点主要集中在“光刻胶”“氮化物”“单晶硅”等主题。

再次,结合时间维度,绘制集成电路材料领域技术

演化图(见图5)。由演化模型的分析方法可知,近10年间“光刻胶”“等离子体”等一直保持着热度,再从演化路径特征中可以推定“光刻胶”“纳米材料”为候选

颠覆性技术。“碳化硅”“氧化锌”“磷化铟”等技术点的演化路径中呈现技术突现、扩散的特点,可推定为潜在颠覆性技术。

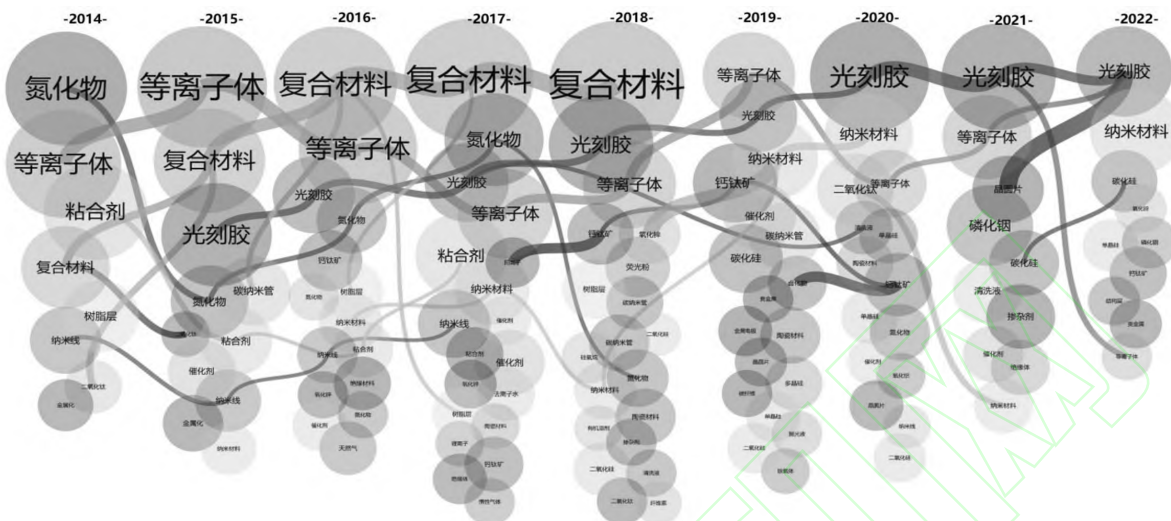


图5 集成电路材料技术演化图

以“等离子体”为例,等离子体材料可引入选择性气体,在晶圆表面高精度刻蚀加工,也是薄膜沉积的关键材料,2014—2015年技术点在热度和位次上都有明显的递增,赋值3;2015—2016年位次降低,赋值-2;2016—2017年热度和位次都大幅降低,赋值-3;演化分析直至2022年,累加各年度赋值并除以总时间跨度,可得演化累积值为0.111。同样的方法,可以计算各技术点赋值,见表7。

表7 集成电路材料技术演化分析

技术点关键词	演化均值	标准化	所属主题
氮化物	0.444	0.320	A2\A4\A7\A9
等离子体	0.111	0.200	A4\A8
复合材料	0.222	0.240	A9
光刻胶	2.333	1.000	A3
碳纳米管	0.778	0.440	A2
氧化锌	0.889	0.480	A2
陶瓷材料	0.778	0.440	A2\A6\A9
...
碳化硅	0.556	0.360	A2
单/多晶硅	0.444	0.320	A1

最后,结合演化路径赋值规则,逐年判断演化显著的技术点形态,按所属技术主题归类累加,再归一化处理后可得各主题的技术演化值,见表8。

2.4 集成电路材料颠覆性技术识别结果及验证

结合上述分析结果,将“突变—演化”模型的技术识别结果映射到平面坐标系中,横轴为技术突变值,纵轴为技术演化值,绘制技术识别坐标图。根据技术类别判定规则,将“非硅基衬底材料”“封装材料”和“光刻胶”等主题归类为颠覆性技术,将“电子特种气体”“抛光材料”和“掩模版”等主题归类为突变性技术,其

余可归类为渐进性技术(见图6)。

表8 集成电路材料各主题技术演化值

主题编号	技术主题	技术演化值
A1	硅片及硅基衬底材料	0.037
A2	非硅基衬底材料	0.306
A3	光刻胶	0.159
A4	掩模版	0.094
A5	抛光材料	0.034
A6	靶材	0.037
A7	电子特种气体	0.091
A8	工艺化学品	0.053
A9	封装材料	0.188

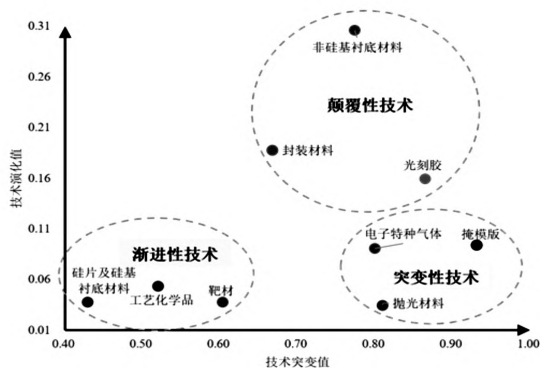


图6 集成电路材料技术识别坐标图

相较于已有研究中仅采用突变模型的颠覆性技术识别结果^[13],本文采用的基于“突变—演化”模型的颠覆性技术识别方法,不仅客观测度了技术的突变性,还直观呈现了技术的演化性,实现了颠覆性技术演进规律的充分把握。为了进一步验证模型的识别结果,借鉴陈旭等^[25]的验证方法,本文将候选颠覆性技术与《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》、《重点新材料首批次

应用示范指导目录(2021版)》、《通过创新引领美国半导体研发》、《美国创新、美国增长:国家半导体技术中心愿景》及《新材料产业发展指南》等政策报告进行比对。近几年,西方国家加强了在“3D堆叠器件”“二维材料”等技术投资,优先保障“先进光刻工艺”等材料供应链的安全自主。我国2021版的重点新材料目录将“氮化镓单晶衬底”等列为关键战略材料;“十四五”规划将“宽禁带半导体”的发展列为科技前沿领域攻关任务,并要求加快“光刻胶”等高纯材料关键技术突破。由此可见,各国政府都敏锐洞察到“光刻胶”“封装材料”“非硅基衬底材料”等技术主题的颠覆性,并积极进行战略布局,这也充分印证了本文提出的“突变—演化”模型在颠覆性技术识别上的有效性和实用性。

3 研究结论

精准识别颠覆性技术有助于国家锚定科研布局方向。本文基于对颠覆性技术突变特征及演化路径的深刻理解,构建颠覆性技术“突变—演化”的识别模型,并结合2014—2022年的全球集成电路材料领域的专利数据展开应用研究。本文得到的主要研究结论如下:

第一,构建了颠覆性技术突变模型。本文基于颠覆性技术的演进特征,从初期影响力、交叉耦合度、技术涵盖面三个维度出发,构建特征指标体系,并结合熵值法计算指标权重匹配突变模型,计算出技术突变值,筛选出突变显著的集成电路材料主题为:掩模版、光刻胶及抛光材料等。

第二,构建颠覆性技术演化模型。本文基于颠覆性技术演化过程中的特征变化,从技术主题词库、技术热点演化两个维度出发,分析技术演化路径的变化,并结合时间维度区分不同技术类别的技术路径,计算出技术演化值,选出演化特征明显的集成电路材料主题为:光刻胶、封装材料及非硅基衬底材料等。

第三,我国集成电路材料产业长期受制于人,先进材料存在着被其他国家和地区“断供”的风险。本文利用“突变—演化”颠覆性技术识别模型,基于集成电路材料九大技术主题的专利数据,识别出集成电路材料颠覆性技术主要存在于:一是光刻胶,包括纳米压印光刻胶,大分子自组光刻胶、极紫外光刻胶、电子束光刻胶等;二是非硅基衬底材料,包括化合物半导体、碳纳米管、石墨烯、二维层状材料等;三是封装材料,包括聚酰亚胺、积层绝缘介质材料、热固性环氧树脂、有机基板材料等。该结果与目前集成电路材料领域技术发展情况较为一致,也证明了本文所构建“突变—演化”颠覆性技术识别模型具有一定的科学性和合理性。

相较于该领域的已有文献,本文弥补了现有研究

对于颠覆性技术演进特征界定、突变模型匹配及演化路径分析的不足,实现了对颠覆性技术的精准识别,为后续相关研究提供了一定的借鉴。然而,受限于专利数据库的影响,本文构建的识别模型在未来也需要进一步优化:一是丰富突变模型的指标筛选,二是拓展演化模型的分析步骤。

参考文献

- [1] 孙永福,王礼恒,陆春华等. 国内外颠覆性技术研究进展跟踪与研究方法总结[J]. 中国工程科学,2018,20(6):14-23.
- [2] 王康,陈悦. 技术融合视角下基于专利的颠覆性技术识别研究[J]. 情报杂志,2022,41(4):29-36,134.
- [3] 黄鲁成,成雨,吴菲菲,苗红,李欣. 关于颠覆性技术识别框架的探索[J]. 科学学研究,2015,33(5):654-664.
- [4] 白光祖,郑玉荣,吴新年,靳军宝,刘秋艳. 基于文献知识关联的颠覆性技术预见方法研究与实证[J]. 情报杂志,2017,36(9):38-44.
- [5] Carlsen H, Dreborg K H, Godman M, et al. Assessing socially disruptive technological change[J]. Technology in Society, 2010, 32(3):209-218.
- [6] Dong - Joon Lim, Anderson T R. Technology trajectory mapping using data envelopment analysis: the ex ante use of disruptive innovation theory on flat panel technologies[J]. R & D Management, 2016, 46.
- [7] Chen C, Zhang J, Guo R S. The D-Day, V-Day, and bleak days of a disruptive technology: A new model for ex-ante evaluation of the timing of technology disruption[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 251(2):562-574.
- [8] Sommarberg M, Makinen S J. A method for anticipating the disruptive nature of digitalization in the machine-building industry[J]. Technological forecasting and social change, 2019, 146(Sep.):808-819.
- [9] 乔亚丽,黄颖,张硕,汪雪峰. 多维视角下颠覆性技术识别:研究进展与未来思考[J]. 情报杂志,2022,41(8):45-52.
- [10] Bower J L, Christensen C M. Disruptivetechologies: Catching the wave[J]. Harvard Business Review, 1995, 73.
- [11] 张佳维. 颠覆性技术的识别指标体系构建与验证研究[D]. 中国科学院大学(中国科学院文献情报中心),2020.
- [12] 王康,陈悦. 基于异质性专利的颠覆性技术早期识别研究[J/OL]. 科学学研究;1-15[2023-05-22].
- [13] 侯广辉,廖桂铭,王刚. 基于突变级数的颠覆性技术识别模型构建及实证研究[J]. 情报杂志,2021,40(10):7-14.
- [14] 宋凯,冉从敬. 基于主题挖掘与专利评估的技术机会识别研究——以智慧农业为例[J]. 图书情报工作,2023,67(3):61-71.
- [15] 王刚,侯广辉,廖桂铭. 不确定性条件下的“创新漏斗”:颠覆性技术的识别方法与多阶段筛选路径研究[J]. 管理评论, 2022, 34(9):98-107,119.
- [16] 李乾瑞,郭俊芳,黄颖,汪雪峰. 基于突变—融合视角的颠覆性技术主题演化研究[J]. 科学学研究,2021,39(12):2129-2139.
- [17] 张金柱,王秋月,仇蒙蒙. 颠覆性技术识别研究进展综述[J].

数据分析与知识发现,2022,6(7):12-31.

- [18] 李 政,刘春平,罗 晖. 浅析颠覆性技术的内涵与培育——重视颠覆性技术背后的基础科学研究[J]. 全球科技经济瞭望,2016,31(10):53-61.
- [19] 束超慧,王海军,刘俊峰. 模块化驱动的颠覆性技术创新网络演化研究——以智能语音为例[J]. 科技进步与对策,2023,40(6):25-35.
- [20] 李乾瑞,郭俊芳,黄 颖,汪雪锋. 基于专利计量的颠覆性技术识别方法研究[J]. 科学学研究,2021,39(7):1166-1175.
- [21] 陈育新,李 健,韩 毅. 核心—边缘理论视角下的颠覆性技术识别研究[J]. 情报理论与实践,2022,45(8):121-129.
- [22] 罗素平,寇翠翠,金 金,袁红梅. 基于离群专利的颠覆性技术预测——以中药专利为例[J]. 情报理论与实践,2019,42(7):165-170.
- [23] Zeeman E C. Catastrophe theory[J]. Springer, 1976, 196(4):65-83.
- [24] Kopalle G P K. Disruptiveness of innovations: measurement and an assessment of reliability and validity [J]. Strategic Management Journal, 2010, 27(2):189-199.
- [25] 陈 旭,江 瑶,熊 焰,张凌恺. 基于专利维度的关键核心技术“卡脖子”问题识别与分析——以集成电路产业为例[J/OL]. 情报杂志:1-8[2023-06-01].
- [26] 马建红,王晨曦,闫 林等. 基于产品生命周期的专利技术主题演化分析[J]. 情报学报,2022,41(7):684-691.
- [27] Frantzi K, Ananiadou S, Mima H. Automatic recognition of multi-word terms: the C-value/NC-value method[J]. International Journal on Digital Libraries, 2000, 3(2):115-130.
- [28] 汪雪锋,任惠超,刘玉琴. 融合聚类信息的技术主题图可视化方法研究[J]. 数据分析与知识发现,2022,6(1):91-100.
- [29] 李 政,罗 晖,李正凤等. 基于突变理论的科技评价方法初探[J]. 科研管理,2017,38(S1):193-200.
- [30] 刘 云,王小黎,闫 哲. 专利质量测度及区域比较研究——以我国石墨烯产业为例[J]. 科学学与科学技术管理,2019,40(9):18-34.
- [31] 刘玉琴,逢金辉,崔志成,汪雪锋,桂 婕. 一种简易的技术主题图绘制方法[J]. 图书情报工作,2017,61(13):125-132.