

中国集成电路制造供应链脆弱性研究^{*}

张云涛 陈家宽 温浩宇^{**}

(西安电子科技大学经济与管理学院,西安 710071)

摘要:集成电路产业是衡量国家科技实力与经济水平的重要标志之一。本文通过分析我国集成电路供应链所处的内外环境,针对其脆弱性,研究相关重要影响因子,提出一种系统评价新思路,对我国集成电路供应链脆弱性进行量化分析。以暴露性、敏感性、恢复性作为集成电路供应链脆弱性的三个主要测度,建立指标评价体系,通过改进的灰色关联法,将关联度作为指标权重,分别计算三个测度对集成电路供应链脆弱性的影响程度,并找出重要影响指标。分析发现我国集成电路供应链脆弱性整体偏高,特别是在关键设备、电子设计自动化(Electronics Design Automation, EDA)软件和专业人才方面劣势突出。为打破这种国际垄断,本文提出在宏观层面可适当重启国家重大专项,加大在集成电路行业的资源投入,建成良好的集成电路供应链生态模式,形成集群式规模发展;在技术领域要健全人才培养体系,着力突破关键软硬件技术,实现集成电路产品自主化。

关键词:集成电路;供应链脆弱性;关键设备;电子设计自动化;灰色关联法

DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2021.01.001

Research on Vulnerability of Chinese IC Supply Chain^{*}

ZHANG Yuntao CHEN Jiakuan WEN Haoyu^{**}

(School of Economics and Management, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The IC industry is one of the important indicators to measure a country's scientific and technological strength and economic level. This paper analyzes the internal and external environment of China's IC supply chain, studies related important influencing factors for its vulnerability, and proposes a new method of systematic evaluation to quantitatively analyze the vulnerability of China's IC supply chain. This paper regards exposure, sensitivity, and restorability as the three main measures of the vulnerability of the IC supply chain, establishes an indicator evaluation system, and uses the correlation degree as the indicator weight through the improved gray correlation method. In this way, this paper separately calculates the influences of the three measures for the vulnerability of the IC supply chain, and finds out the significant impact indicators. The analysis shows that the overall vulnerability of China's IC supply chain is relatively high, especially in areas such as key equipment, EDA software and professional talents. In order to break this international monopoly model, this article proposes that at the macro level, it is possible to restart major national projects, increase resource input in the IC industry, build a good IC supply chain ecological model, and form cluster development; in the technical field, it is necessary to improve talent training system, focus on breaking through key software and hardware technologies, and achieve IC products independence.

Keywords: Integrated Circuit; Supply Chain Vulnerability; Key Equipment; Electronic design automation (EDA); Gray Correlation Method

2020年4月10日习近平总书记在中央财经委员会第七次会议中指出,新冠肺炎疫情的冲击

^{*} 中国工程院咨询研究项目“中国高端制造核心技术瓶颈突破战略研究”(2019-XZ-58)

^{**} E-mail:hywen@xidian.edu.cn; Tel:029-81891360

暴露出我国产业链、供应链存在的风险隐患。为保障我国产业安全和国家安全,要着力打造自主可控、安全可靠的产业链、供应链^[1]。

中国目前正处在由制造业大国向制造业强国转变的进程中,作为高端电子装备制造基础的集成电路产业无疑是衡量国家科技实力和经济实力的重要标志^[2]。集成电路产业是由传统制造业、信息技术产业和新型材料产业等高度聚合而成。中国的集成电路产业与发达国家相比存在着很大的差距,在宏观方面存在过度依赖全球供应链的支持,在全球供应链顺畅时缺乏风险意识,对于需要长期高投入的环节缺少产业支持手段。由此,在微观上,我国集成电路供应链逐渐形成了缺乏核心知识产权、电子设计自动化(Electronics Design Automation, EDA)软件覆盖的设计环节较少的局面,一些集成电路制造关键装备和原材料大部分依赖进口,技术创新能力相对较弱,供应链整合能力较差,这些都导致中国集成电路产业存在巨大的隐患,随时有被国外限制造成停产的危险。

美国制裁中兴和打压华为事件给中国集成电路产业的发展造成了严重阻碍,也向中国集成电路产业发出了安全警示。中国集成电路产业要掌握主导权独立发展,除了需要在宏观上给予必要的产业扶持政策,同时必须深入研究中国集成电路供应链存在的风险点和脆弱性问题。本文结合对中国集成电路产业的相关研究,以脆弱性的三种特性为基础,确定了评价指标体系,构建了中国集成电路制造供应链脆弱性评价模型,对集成电路制造供应链的脆弱性程度进行量化测度与评价,明确供应链各环节的风险点及脆弱程度,并由脆弱性的角度对中国集成电路制造供应链的建设与完善提出了相应的对策建议。

1 中国集成电路制造供应链的脆弱性分析

1.1 供应链脆弱性问题研究现状

脆弱性的概念最早来源于对自然环境的研究,自然环境中所有的系统均可能存在不同程度的脆弱性,它已经成为系统安全领域不可或缺的部分^[3]。脆弱性概念的普适性很强,目前已经逐渐应用于社会、经济系统的研究,如旅游系统、金融系统、供应链系统等。针对供应链脆弱性问题的研究中,Wagner 和 Bode^[4,5]提出,在复杂的供应链中,企业单一的供货源、对供应商和客户的过度依赖直接影响到企业的经营活动,尤其是当供应链的竞争对手对其进行垂直整合时,企业将面临供应链中断的风险;他们还提出,供应链存在高度脆弱性是由于供应链本身具有复杂性和不确定性,这些特性影响了供应链中断的发生概率和程度。Bogataj^[6]指出,驱动供应链脆弱性的外部因素包括生态环境、经济和政治环境等的重大变化,突发的灾难性事件,例如地震、海啸等,也会导致供应链存在高度的脆弱性,增大供应链中断的风险。Kurniawan 和 Zailani 等^[7]提出,基础设施的不完善无法支撑先进的技术以及其他经营活动,使供应链的脆弱性显著提高;他们指出,供应链的透明度、灵活性和可视性可以成为检测供应链脆弱性程度的有效指标。

1.2 供应链脆弱性概念界定

中国集成电路制造供应链脆弱性是指供应链受到内部和外部各种因素共同影响时对供应链正常运行产生阻碍的程度,以及供应链恢复正常运行的能力。我们将中国集成电路制造供应链脆弱性分为暴露性、敏感性、恢复性三种特性,分别加以研究分析,建立利用三种特性对中国集成电路

制造供应链脆弱性进行评价的模型,通过实证评价当前中国集成电路制造供应链的脆弱性,并提出相应的应对策略。

1.3 供应链脆弱性分析

1.3.1 外部环境

在国际贸易摩擦加剧和新冠疫情的影响下,全球半导体市场陷入新低谷,尽管技术升级持续推进,但产业发展不确定性增加。2019年全球半导体行业营收为4121亿美元,同比下滑12.1%,随着全球经济放缓及贸易摩擦所带来的市场迅速变化,全球半导体市场正处于疲软状态,这对本身核心技术(EDA软件、光刻机)缺失的我国集成电路制造产业带来了巨大挑战。根据全球半导体协会(Semiconductor Industry Association, SIA)发布的2019年半导体市场数据显示,全球十大半导体企业销售额为2291.33亿美元,占比近55%,企业总体排序前四大企业为英特尔、三星电子、SK海力士和美光科技^[8]。从企业分布情况看(表1),美国企业仍保持领先地位,前十位中5家是美国企业,2家是韩国企业,2家是欧洲企业,1家是日本企业。从这些数据可以看到,在集成电路供应

表1 2019年全球市场份额前10名半导体企业

Tab.1 Top 10 Semiconductor Companies by Global Market Share in 2019

| 排名 | 供应商 | 2019年销售额(亿美元) | 2019年市场份额(%) | 所属国家 |
|----|--------|---------------|--------------|--------|
| 1 | 英特尔 | 657.93 | 15.7 | 美国 |
| 2 | 三星电子 | 522.14 | 12.5 | 韩国 |
| 3 | SK海力士 | 224.78 | 5.4 | 韩国 |
| 4 | 美光科技 | 200.56 | 4.8 | 美国 |
| 5 | 博通 | 152.93 | 3.7 | 美国 |
| 6 | 高通公司 | 135.37 | 3.2 | 美国 |
| 7 | 德州仪器 | 132.03 | 3.2 | 美国 |
| 8 | 意法半导体 | 90.17 | 2.2 | 意大利、法国 |
| 9 | Kioxia | 87.97 | 2.1 | 日本 |
| 10 | 恩智浦 | 87.45 | 2.1 | 荷兰 |

链中,关键节点集中在美国、韩国、日本等半导体高端企业,并且优势显著,导致我国在集成电路制造供应链中的脆弱性问题。

集成电路是半导体最重要的组成部分,国内的半导体行业上市公司多数分布在集成电路产业。数字化与信息化在中国的深入推广使中国成为集成电路的消费大国,但是中国集成电路企业的全球半导体市场份额仅占到3%左右。中国集成电路制造供应链不仅缺乏竞争力也面临着随时被“卡脖子”的危险。

1.3.2 内部环境

集成电路制造供应链上游是各类材料和制造装备企业,中游是集成电路设计企业,下游是集成电路制造和封测企业^[9]。集成电路制造供应链架构如图1所示。位于供应链上游的集成电路材料生产和集成电路装备制造支撑了整个供应链的生存和发展。作为集成电路制造供应链中细分领域最多的一环,集成电路的各种材料贯穿集成电路制造(晶圆制造、芯片制造)和芯片封测的整个过程。据国际半导体设备与材料产业协会(Semiconductor Equipment and Materials International, SEMI)统计,2017年全球集成电路材料产业规模达到469亿美元,中国大陆地区自2016年以来市场容量高速增长(2017年同比增长12%),显示出巨大的市场需求潜能。

近年来,随着国家政策的调整和国内市场需求的变化,我国集成电路产业在材料方向发展迅速,关键材料生产逐渐自主化,并培养出一大批具有国际竞争力的企业。但是,根据国家工信部发布的数据,在供给侧,对比当前我国在集成电路材料上的需求,关键材料的生产、研发能力依然处于弱势,有32%的关键材料在众多大型企业处于空白,52%依赖进口(表2)。这种被“卡脖子”的情况严重制约了我国集成电路产业的健康发展。

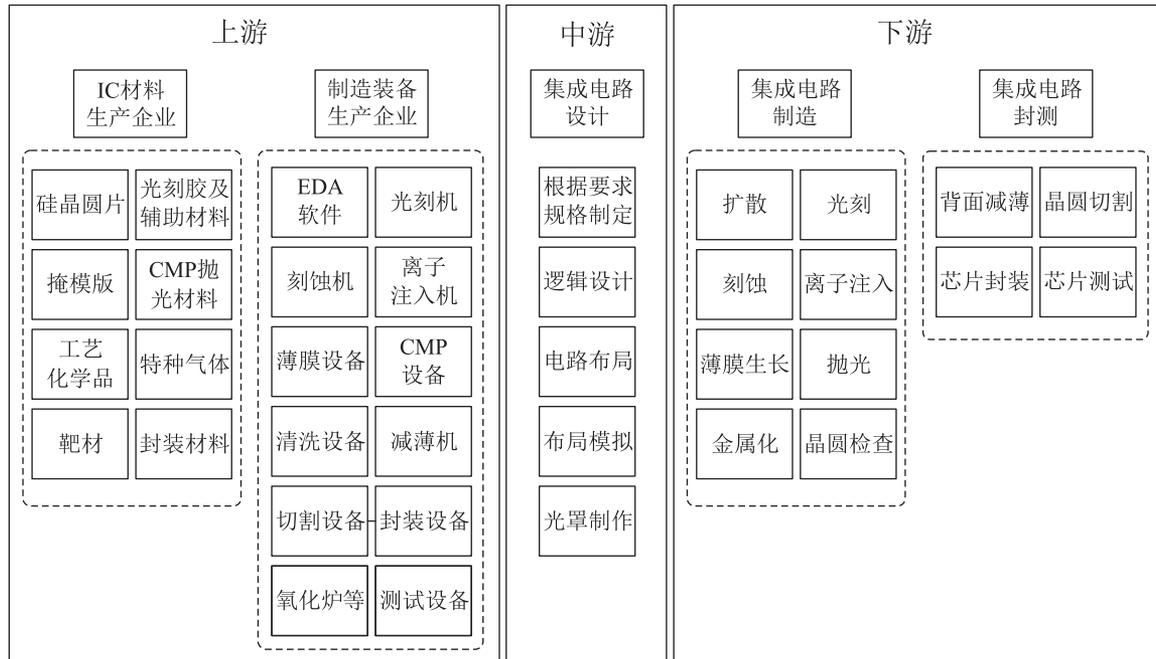


图1 集成电路制造供应链架构

Fig. 1 Supply Chain Architecture of Integrated Circuit Manufacturing

表2 中国集成电路制造产业主要材料和关键设备生产水平与国外对比

Tab. 2 Comparison of the Production Level of Main Materials and Key Equipment in China's Integrated Circuit Manufacturing Industry with Foreign Countries

| 关键设备和材料 | 国际 | 国内 |
|---------|---|--|
| 光刻机 | 阿斯麦 (ASML) 7nm/5nm 采用 NA = 0.33 EUV 技术 | 上海微电子 (SMEE) IC 前道制造 90nm 光刻机量产 |
| 刻蚀机 | 硅基刻蚀主要被 Lam 和 AMAT 垄断 | 中微半导体和北方华创具备竞争实力 |
| 薄膜设备 | CVD 被日立、Lam、TEL、AMAT 垄断, PVD 被 Lam 和 AMAT 垄断 | 北方华创和沈阳拓荆具备了一定的竞争力 |
| 离子注入机 | AMAT 占 70%, Axceils 占 18% | 中科信和凯世通已经参与竞争 |
| 清洗设备 | 主要来自 DNS、Lam、TEL 等公司 | 盛美半导体、北方华创、至纯科技具备了一定的国际竞争力 |
| 测试设备 | 主要由泰瑞达和爱德万两家公司垄断 | 长川科技和精测电子可以提供自研产品 |
| EDA | 主要为三家公司: Cadence, Synopsys, Mentor (简称 EDA 三巨头) | 华大九天与国微等公司可提供部分工具 |
| 硅片 | 主要被日本、德国、韩国等半导体公司垄断, 占据了全球 95% 的市场份额 | 主要硅片产品集中在 6-8 英寸, 高端产品研发生产处于起步阶段 |
| 光刻胶 | 市场基本被日本 JSR、东京应化、住友化学、信越化学, 美国罗门哈斯等企业垄断 | 适用于 6 英寸硅片的 G/I 线光刻胶的自给率分别约为 60% 和 20%, 高端产品完全依赖进口 |
| 掩模版 | 由美国、韩国、中国台湾等半导体企业占据 80% 以上的市场份额 | 以美国 Photronics 和日本 Toppan 等外资企业为主, 国内市场占有率很低 |
| 工艺化学品 | 由德国、美国、韩国、日本等企业主导, 占据超过 85% 的市场份额 | 技术水平相对较低, 仅有少数国产产品达到了国际 SEMI G4 标准 |
| 电子气体 | 由美国、德国、法国、日本等企业占据了全球电子气体 90% 以上的市场份额 | 85% 的市场份额需要进口, 国产产品集中在中低端市场 |
| 抛光材料 | 主要被美日欧企业垄断。其中, 陶氏化学一家独大, 占整个市场份额的 80% | 国产化率约为 5%, 高端产品依然空白。 |
| 靶材 | 全球靶材制造行业呈现寡头垄断格局, 少数日美化工与制造集团主导了全球靶材制造行业 | 目前已初具规模, 但高端产品和工艺仍被国外垄断 |
| 封装材料 | 全球封装材料的主要生产厂商集中在我国台湾、韩国和日本三地 | 多在中低端市场领域, 技术、成本等方面依然缺乏竞争优势 |

集成电路制造装备整合了集成电路的制造工艺,只要拥有相关装备就能够保证生产并确保达到要求的工艺水平。即“一代器件,一代设备”,新的产品就意味着要有新的装备。因此,集成电路装备的生产同样是整个集成电路制造供应链中的决定性因素。

2 中国集成电路制造供应链脆弱性测度

2.1 构建评价指标体系的原则

影响中国集成电路制造供应链脆弱性的因素是多种多样的,并具有动态性、内生性、复杂性和关联性,各种因素相互影响、相互作用。因此,构建综合评价指标体系,在选择测度指标时尽量遵循代表性、科学性、层次性、目的性及可比性等原则,选取具有代表性的关键指标,由集成电路专家对相关性的指标进行合理取舍^[10]。

2.2 影响因素及评价模型的确定

2.2.1 影响因素

根据张倩^[11]、行业专家及笔者总结,可将中国集成电路制造供应链脆弱性影响因素分为暴露性、敏感性、恢复性三个主要方面。

暴露性是集成电路制造供应链暴露于外界环境,承担的压力、风险的程度。集成电路制造供应链的暴露性与脆弱性呈正向关系,也就是说暴露性越大,其存在的脆弱性就越高,集成电路制造供应链就越容易受到外界因素的影响;集成电路制造供应链敏感性是指由于供应链内部的不完善、不匹配和存在的短板,使得供应链在运作时对外界影响的敏感程度,能够反映不利事件对集成电路制造供应链造成损失的程度。脆弱性与敏感性也呈正向关系,即敏感性越强,其脆弱性越强^[12],集成电路制造供应链因外界影响而

熔断的风险程度就越高;集成电路制造供应链的恢复性是指供应链对不利事件的适应能力和恢复能力,反映了集成电路制造供应链对不利事件的风险防范能力。恢复性和脆弱性呈负向关系,即供应链在受到外界环境因素的不利影响后,如果影响的强度能够在供应链自身弹性恢复范围内^[12],则供应链能够以较高的水平恢复正常运作。

根据相关研究结果、行业特性和脆弱性的特点,选取暴露性、敏感性和恢复性3个准则层,指标涉及专业人才、关键软硬件技术设备、社会环境和行业管理等方面,包括22个指标。在遵循科学、系统和可操作性等原则的基础上,建立了中国集成电路制造供应链脆弱性三级评价指标体系^[13],如表3所示。

2.2.2 模型构建

根据集成电路制造供应链脆弱性指标体系的准则层三个指标——即暴露性、敏感性和恢复性对供应链脆弱性的影响方向和影响程度^[13],建立了集成电路制造供应链脆弱性评价模型:

$$\text{脆弱性}(T) = \text{暴露性}(T_1) + \text{敏感性}(T_2) - \text{恢复性}(T_3)$$

其中,准则层三个指标的评价公式表示为:

$$T_k = W_k^* \bar{X}_k \quad k=1,2,3$$

式中: T_k 为准则层第 k 个指标的综合评价价值;

W_k^* 为准则层第 k 个特征中各指标的归一化指标权重;

\bar{X}_k 为准则层第 k 个特征中各指标得分的平均值。

3 中国集成电路制造供应链脆弱性评价

3.1 数据收集

本文设计的中国集成电路制造供应链脆弱

表3 中国集成电路制造供应链脆弱性评价指标体系

Tab. 3 Vulnerability Evaluation Index System of China's Integrated Circuit Manufacturing Supply Chain

| 目标层 | 准则层 | 指标层 |
|----------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 中国集成电路制造供应链脆弱性 | 暴露性 R | 关键设备国外供应商比率 R1 ^[14] |
| | | 关键材料国外供应商比率 R2 ^[15,16] |
| | | EDA软件自主研发能力 R3 ^[17] |
| | | 集成电路产品国际市场占有率 R4 ^[18] |
| | 敏感性 S | 集成电路产品国内市场占有率 S1 ^[11] |
| | | 新产品销售收入 S2 ^[19] |
| | | 年相关专利发明数 S3 ^[20] |
| | | 供应链的空间聚集程度 S4 ^[21] |
| | | 集成电路行业 R&D 经费投入 S5 ^[22] |
| 恢复性 E | 研发机构增长率 E1 ^[24] | |
| | 集成电路制造企业增长率 E2 ^[19] | |
| | 集成电路封测企业增长率 E3 ^[19] | |
| | 集成电路设计企业增长率 E4 ^[19] | |
| | 集成电路专业人才培养体系 E5 ^[24] | |
| | 国家产业资金支持 E6 ^[25] | |
| | 税收优惠政策 E7 ^[26,27] | |
| | 知识产权保护 E8 ^[24] | |
| | 市场增长潜力 E9 ^[24] | |

性评价体系指标包括定性指标和定量指标,指标体系所涵盖的范围较大。本文从《集成电路产业发展报告(2018—2019)》、张倩^[11]、王晓川^[20]、冷紫莹^[22]等文献中获得相关指标,通过问卷调查的形式,采用李克特五级量表打分,请有关专家、学者针对给出的定量指标及定性指标加以评分。

3.2 数据分析

灰色关联分析法能够衡量系统因素间的紧密程度,也能够对由多层次综合指标体系所描述

的总体的优劣程度做出评判。中国集成电路行业并没有非常明确、精准的评价信息或方向,总体来说是一个灰色体系,同时集成电路供应链是一个快速发展、不断变化的系统。因此在进行多因素分析时应着重体现其动态发展趋势,确定各因素对系统发展趋势的影响程度,而灰色关联分析法能够通过几何曲线直观的反应这种需求。

我们为专家提供了文献中选取的定性指标,同时也有具体数值的定量指标,比如一些产业上的数据,然后由专家来判断进行打分,并采用李克特5级量表打分,选择1,3,4,5作为脆弱性等级分界点,把脆弱性等级划分为3个等级,分别为“低度脆弱性”“中度脆弱性”“高度脆弱性”。根据脆弱性的等级划分,赋予每个脆弱等级相同的权重,均为1/3,得出脆弱性指标范围,并以此确定脆弱度等级^[13],如表4所示。

得到决策矩阵后,利用改进的灰色关联分析法,通过确定反映系统行为特征的参考数列和影响系统行为的比较数列寻求系统中各子系统(或要素)之间的数值关系。具体步骤如下。

令 m 个指标 n 个专家的决策矩阵为 $X = (X_{ij})_{m \times n}$,运用改进的灰色关联法确定各指标的权重^[13],具体计算步骤如下:

1)取每一项指标的专家最高评分组成比较数列 X_0 作为灰色关联法的比较数列。

$$X_0 = (X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(m))$$

2)求出 n 位专家对每一项指标评分结果的平均值 X_i

$$X_i = Y_i/n$$

表4 集成电路制造供应链脆弱性等级划分

Tab. 4 Vulnerability Classification of Integrated Circuit Manufacturing Supply Chain

| 脆弱性评分范围 | [0,1) | [1,3) | [3,4) | [4,5) | [5, +∞) |
|---------|-------|-------------|-------------|----------|---------|
| 脆弱性指标范围 | <0.33 | 0.33 ~ 1.33 | 1.33 ~ 2.33 | 2.33 ~ 3 | >3 |
| 脆弱性等级 | 正常 | 低度脆弱性 | 中度脆弱性 | 高度脆弱性 | 风险 |

其中, Y_i 为 n 位专家对第 i 项指标的评分之和。

3) 计算 X_i 与比较数列 X_0 之间差的平方, 求出准则层指标距离 B_k

$$B_k = \frac{1}{q} \sum (X_0(i) - X_i)^2 \quad k = 1, 2, 3$$

其中, k 表示准则层中三个指标的下标; q 表示各准则层中的指标个数。

4) 计算准则层各指标权重 W_k

$$W_k = \frac{1}{1 + B_k} \quad k = 1, 2, 3$$

5) 计算准则层各指标的归一化权重

$$W_k^* = \frac{W_k}{\sum W_k} \quad k = 1, 2, 3$$

本专业学者及业内专家对每个指标进行主观的判断给出相应的评分, 根据改进的灰色关联度算法可以计算出各个指标的权重值。这样得到的权重既能够反应客观事实也能够反映专家的凭经验的主观判断。

1) 根据决策矩阵, 计算出比较数列 X_0 和 m 个指标各自的平均值 X_i 的基础上得到指标间的距离 B_k

$$B_1 = (0.803, 0.340, 0.230, 0.730)$$

$$B_2 = (0.613, 1.250, 0.672, 0.613, 0.613)$$

$$B_3 = (0, 0.264, 0.049, 0.043, 0.077, 0.340, 0.038, 0.340, 0.033)$$

2) 计算一级指标权重并作归一化处理得到 W_k^*

$$W_1^* = (0.206, 0.277, 0.302, 0.215)$$

$$W_2^* = (0.214, 0.153, 0.206, 0.214, 0.214)$$

$$W_3^* = (0.114, 0.098, 0.118, 0.119, 0.115, 0.093, 0.120, 0.093, 0.120)$$

3) 分别计算三个特性的综合评价值并得到最终集成电路供应链脆弱性的量化结果 T

$$T_1 = 3.160 \quad T_2 = 2.477 \quad T_3 = 3.6834$$

$$T = T_1 + T_2 - T_3 = 1.952$$

从实证分析可以看出当前我国集成电路制造供应链脆弱性较高。其中暴露性 $T_1 = 3.160$ 、敏感性 $T_2 = 2.477$ 、恢复性 $T_3 = 3.684$, 各指标量化结果中 R_1 、 R_3 和 S_5 是最高的。通过集成电路供应链的实证分析, 结合表 3 所给出的等级划分区间, 可以看出当前我国集成电路供应链脆弱性较高。

暴露性和敏感性的评价表明我国集成电路产业的相关设备材料、产品市场占有率和技术研发方面较大的提升空间, 意味着存在被严重“卡脖子”的风险。在供应链的具体环节所存在的风险也不完全一致, 其中知识产权密集的环节(包括光刻机、EDA 等)风险最大, 也最不容易突破技术壁垒。

恢复性指标值揭示出国家对集成电路产业的重视。通过多年的努力, 我国集成电路供应链的恢复性虽然已经达到了一个相对合理的水平, 但随着全球供应链受到“逆全球化”思潮的冲击, 单纯依靠市场和常规产业扶持政策已经不能很好地应对风险, 需要从供应链的角度重新识别风险点, 找到供应链上中下游各环节的驱动机制, 针对核心环节加大投入, 解决整个供应链的脆弱性问题。

4 对策建议

本文以中国集成电路制造供应链为研究对象, 利用改进的灰色关联分析方法, 在行业专家验证的基础上获得关键定性和定量评价指标, 将指标关联度作为权重实现对供应链脆弱性的量化描述, 得到供应链脆弱性的综合评价。在此基础上, 提出对策建议如下:

1) 从下游需求切入, 面向供应链组织重大

专项

集成电路不仅是信息、通信等技术的基础,也是新基建和国防事业的基石。国家已经通过各类重大专项,直接对集成电路产业进行投入,在先进技术、安全可靠、自主可控等方面建立了较完整的产业体系^[28]。然而,由于供应链受复杂的市场环境和技术路径依赖等因素影响,下游用户通常会选择技术领先、价格合理、生态完善的集成电路产品。比如国产中央处理器(Central Processing Unit, CPU)虽然已达到较高的技术水平,然而在价格、生态方面并没有形成较大优势,国产CPU的开发机构虽然获得相关的基金支持,但下游企业的技术选型风险没有保障,产品难于推广,难于达到“从输血到造血”的转变,更难于形成良性的技术和市场生态。

建议在国家政策支持下调整投入方向,加强供应链及生态体系布局,在扶持集成电路供应链骨干企业突破核心技术的同时,以重大国家工程为先导,围绕国家核心需求,支持用户方积极选择国产集成电路产品,推进集成电路制造国产化进程,达到供应链的自主可控。

总之,国家政策应当从面向企业的支持,转变为面向供应链的支持,以构建集成电路供应链良性生态。

2) 重要技术需要竞争,关键技术需要备份

由前文数据分析可知,我国集成电路供应链痛点主要是EDA软件和关键设备(光刻机等),而封装、测试等技术已经相对完备。对关键技术研发的大力支持符合国家的战略。按照一般的市场规律,企业的创新动力通常来自竞争的压力。然而,直接针对少数核心企业的直接支持可能会影响中小企业的发展,也不利于培育颠覆性技术产生的环境。因此,应当在封装、测试等较

为成熟的产业鼓励竞争和创新,在“卡脖子”的关键技术方面也需专门安排企业和技术“备份”,避免“一家独大”,避免形成技术性的寻租空间。

总之,重要的技术有竞争,关键的技术有备份,有利于集成电路供应链在国内循环中的发展,也有利于激励技术突破,增强供应链的国际竞争力。

3) 健全人才培养体系,创新管理体制机制

据统计我国目前集成电路产业从事人员不足40万,按照2020年集成电路产业突破1万亿大关,至少需要再增加近30万相关人员,所以我国集成电路专业人才存在巨大缺口^[30]。高校要打破学术型人才垄断格局,扩大工程专业研究生比例,通过学校与企业联合培养,避免单纯的模仿学术型培养方式,以满足社会对集成电路应用型人才的需求,同时设法提高专业人才的自主创新能力,并鼓励在本领域进行创业。

围绕核心产品,积极发挥产业集群骨干企业的中坚传代作用,带动集群内中小企业的协同发展,快速将创新成果产业化,同时加强与集群外部先进科技企业的合作,提升集群的信息化发展水平。由政府牵头、企业参与制定相关管理体制机制,建立集成电路产业自主创新示范区,形成以集成电路龙头企业为中心的供应链联盟,合理调用多种生产要素,创建优质生产条件,创造可持续发展的创新群落生态,通过知识共享和技术引导提高整个行业的自主学习和创新能力。

参考文献

[1] 习近平. 国家中长期经济社会发展战略若干重大问题[J]. 求是, 2020(11): 4-7.

XI Jinping. Some Major Issues Concerning the National Strategy for Medium Long-term Economic

- and Social Development[J]. QiuShi,2020(11):4-7.
- [2]丁文武,孙加兴,寇纪松.新时期我国集成电路产业的发展战略及对策[J].天津大学学报(社会科学版),2010,12(6):481-486.
- DING Wenwu, SUN Jiaying, KOU Jisong. Development Strategy and Policy Proposal for China's IC Industry the New Period[J]. Journal of Tianjin University (Social Science), 2010, 12 (6):481-486.
- [3]高贵兵,荣涛,岳文辉.基于复杂网络的制造系统脆弱性综合评估方法[J].计算机集成制造系统,2018,24(9):2288-2296.
- GAO Guibing, RONG Tao, YUE Wenhui. Vulnerability Assessment Method for Manufacturing System Based on Complex Network [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24 (9): 2288-2296.
- [4]WAGNER S M, BODE C. An Empirical Investigation into Supply Chain Vulnerability[J]. Journal of Purchasing and Supply Management, 2006,12 (6):301-312.
- [5]WAGNER S M, BODE C. Dominant Risks and Risk Management Practices in Supply Chains [M]. Supply Chain Risk:Springer,2009.
- [6]BOGATAJ D,BOGATAJ M. Measuring the Supply Chain Risk and Vulnerability in Frequency Space [J]. International Journal of Production Economics,2007,108 (1-2):291-301.
- [7]KURNIAWAN R, ZAILANI S H, IRANMANESH M, et al. The Effects of Vulnerability Mitigation Strategies on Supply Chain Effectiveness: Risk Culture as Moderator [J]. Supply Chain Management: an International Journal, 2017, 22 (1):1-15.
- [8]前瞻产业研究院.我国集成电路行业发展现状与竞争格局[J].电器工业,2020(5):49-53.
- Foresight Industry Research Institute. Development Status and Competitive Pattern of Integrated Circuit Industry in China [J]. Electrical Appliance Industry,2020(5):49-53.
- [9]刘晓萌,贺琪,王岳.我国集成电路产业运行特点及问题研究[J].国防科技工业,2019(8):51-54.
- LIU Xiaomeng, HE Qi, WANG Yue. Research on the Operation Characteristics and Problems of China's integrated Circuit Industry [J]. National Defense Technology Industry,2019(8):51-54.
- [10]杨年芳,严奉宪.基于复杂系统的柑橘产业链脆弱性研究[J].浙江农业学报,2011,23(1):164-169.
- YANG Nianfang, YAN Fengxian. The Vulnerability Analysis and Evaluation Index System Study of the Citrus Industry Chain based on the Complex Systems[J]. Journal of Zhejiang Agriculture,2011,23(1):164-169.
- [11]张倩.关于我国集成电路装备国产化问题的研究[J].电子测量技术,2019,42(2):28-32.
- ZHANG Qian. Research on Localization of Integrated Circuit Equipment in China [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42 (2):28-32.
- [12]陈一君,武志霞,胡文莉.绿色建筑经济脆弱性的主成分和复杂网络分析——以川南经济区为例[J].四川理工学院学报(社会科学版),2019,34(5):67-87.
- CHEN Yijun, WU Zhixia, HU Wenli. An Analysis of Principal Component and Complex Network of Economic Vulnerability of Green Buildings: A

- case study of the South Sichuan Economic Zone [J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Social Sciences Edition), 2019, 34 (5): 67-87.
- [13] 刘明菲, 张欢, 李玉婷. 基于改进灰色关联法的农产品冷链物流脆弱性评价[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2017, 39(6): 664-668.
- LIU Mingfei, ZHANG Huan, LI Yuting, CHENG Binwu. Vulnerability Evaluation of Cold Chain Logistics of Agricultural Products Based on Improved Grey Correlation Method[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information and Management Engineering Edition), 2017, 39 (6): 664-668.
- [14] 田陆屏. 集成电路关键设备市场分析与发展战略[J]. 电子工业专用设备, 2006(1): 1-7.
- TIAN Luping. The Market Analysing and Development Strategy of IC Key Equipment [J]. Special Equipment for Electronic Industry, 2006 (1): 1-7.
- [15] “先进半导体材料及辅助材料”编写组. 中国先进半导体材料及辅助材料发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 10-19.
- Writing Group of Advanced Semiconductor Materials and Auxiliary Materials. Strategic Study on the Development of Advanced Semiconductor Materials and Auxiliary Materials in China [J]. Chinese Engineering Science, 2020, 22 (5): 10-19.
- [16] 李铁成, 李茜楠. 全球集成电路关键材料产业发展态势与风险分析[J]. 中国集成电路, 2020, 29(10): 11-17.
- LI Tiecheng, Li Qiannan. Development Trend and Risk Analysis of Global IC Key Materials Industry [J]. China Integrated Circuit, 2020, 29 (10): 11-17.
- [17] 张三锋, 周雄, 杨世恒. 大力发展国产EDA, 保障国家网信安全[J]. 中国信息安全, 2020(5): 62-63.
- ZHANG Sanfeng, Zhou Xiong, Yang Shiheng. Develop EDA and Ensure National Network and Information Security [J]. China Information Security, 2020(5): 62-63.
- [18] 李珂. 中国集成电路产业发展迎来新高潮[J]. 互联网经济, 2020(8): 12-15.
- LI Ke. The Development of China's Integrated Circuit Industry is Ushering in a New Climax [J]. Internet Economy, 2020(8): 12-15.
- [19] 张倩. 《瓦森纳协定》调整下中国半导体产业发展的思考[J]. 电子技术应用, 2020, 46(10): 34-38.
- ZHANG Qian. Thoughts on the Development of Integrated Circuit Industry in China under the Adjustment of the Wassenaar Agreement [J]. Electronic technology Applications, 2020, 46 (10): 34-38.
- [20] 王晓川, 李昱, 周国华. 中国集成电路产业专利产出与绩效的关系[J]. 科技管理研究, 2020, 40(4): 146-153.
- WANG Xiaochuan, LI Yu, ZHOU Guohua. Relationship Between Patent Output and Performance of IC Industry in China [J]. Science and Technology Management Research, 2020, 40 (4): 146-153.
- [21] 陈志润, 李安琪. 全产业链视角下我国集成电路产业发展的路径[J]. 中国林业经济, 2020(4): 41-43, 52.

- CHEN Zhirun, LI Anqi. The Development Path of IC Industry from the Perspective of the Whole Industry Chain in China [J]. *China Forestry Economics*, 2020(4): 41-43, 52.
- [22] 冷紫莹. 国家集成电路投资基金投资对芯片行业研发创新影响研究[D]. 南昌: 江西财经大学, 2020.
- LENG Ziyang. Research on the Impact of Investment from the National Integrated Circuit Investment Fund on R&D and Innovation in Chip Industry [D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2020.
- [23] 王桓. 如何破局我国集成电路产业人才荒[J]. *中国信息化*, 2019(10): 12-13.
- WANG Huan. How to Break the Shortage of Talents in China's Interated Circuit Industry [J]. *China Informatization*, 2019(10): 12-13.
- [24] 电子政务编辑部. 新时期促进集成电路产业和软件产业高质量发展的若干政策[J]. *电子政务*, 2020(9): 2 + 121.
- E-Government Editorial Department. Some Policies to Promote the High-quality Development of Integrated Circuit Industry and Software Industry in the New Era [J]. *E-government*, 2020(9): 2 + 121.
- [25] 张强. 产业投资基金在半导体行业中的应用[D]. 上海师范大学, 2017.
- ZHANG Qiang. Application of industrial Investment Fund in Semiconductor Industry [D]. Shanghai Normal University, 2017.
- [26] 张振华. 我国半导体显示产业财政补贴效应及研发效率研究[J]. *工业技术经济*, 2020.
- ZHANG Zhenhua. Research on Government Subsidy Effect and Research Efficiency of Semiconductor Display Industry in China [J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2020.
- [27] 张蒙蒙. 创新驱动下我国电子信息产业的税收激励政策研究[D]. 江西财经大学, 2020.
- ZHANG Mengmeng. Research on Tax Incentive Policies of China's Electronic Information Industry Driven by Innovation [D]. Jiangxi University of Finance and Economics, 2020.
- [28] 王龙兴. 探讨“十三五”期间上海集成电路产业发展的主要目标和主要任务[J]. *集成电路应用*, 2017, 34(2): 13-17.
- WANG Longxing. The Main Goal of the Development of Shanghai Integrated Circuit Industry and the Main Task During 13th Five-Year [J]. *Integrated Circuit Applications*, 2017, 34(2): 13-17.

作者贡献说明

张云涛: 撰写文章初稿, 设计论文框架和模型;
陈家宽: 收集整理资料, 模型运算, 修改文稿;
温浩宇: 收集整理对策建议, 修改文稿, 定稿。