

半導体デバイスの開封前に適用可能な
超音波加熱を利用した故障箇所絞込み技術

(Fault Location Technique Using Ultrasonic Heating
Applicable to Semiconductor Devices prior to Decapsulation)

2022 年 1 月

博士 (工学)

松井 拓人

豊橋技術科学大学

要旨

半導体デバイスのチップ部に対する故障箇所の絞込みには、封止樹脂の開封作業が必要となる。しかし、封止樹脂の開封は故障の再現性の悪化を招く恐れがある。樹脂の開封前に故障箇所を把握可能な既存手法として、磁場や発熱を利用し半導体デバイスの電流経路を観察する手法が提案されている。既存手法よりも高い空間分解能での観察のため、本論文は超音波加熱を利用した手法を提案する。提案手法の信号と超音波加熱の関係に対する波動の伝搬に基づいた検証を目的とし、三つの論点において、本論文の第4章から第6章で議論した。

本論文の第1章には、研究の目的と全体の構成をまとめている。第2章と第3章には、研究背景および提案手法の原理と測定系についてまとめている。

本論文の一つ目の論点として、第4章では、超音波加熱を利用する提案手法により電流経路を観察可能か議論した。一般に、超音波の計測技術に関する研究報告には、提案手法のように超音波加熱を電流経路の観察に利用する例はほとんどみられない。第4章では、実験と計算より、提案手法の信号が超音波加熱に起因していることを示し、電流経路が提案手法により観察可能なことを明らかにした。

二つ目の論点として、第5章では、提案手法により封止樹脂の開封前に半導体デバイスの電流経路を観察可能か議論した。実験より、封止樹脂を介しても提案手法を用いて電流経路の観察が可能なことを示した。実験と計算より、超音波の周波数には封止樹脂の厚さに対し共振に起因する最適値があり、周波数の最適値は反射波の周波数成分から推定可能なことを示した。提案手法による半導体デバイスの故障箇所の絞込みにおいて、推定した最適値で故障箇所をより明瞭に観察可能なことを明らかにした。加えて、商用の半導体デバイスでの故障箇所絞込みへの提案手法の適用例を示した。

三つ目の論点として、第6章では、積層構造を有する半導体デバイスへの適用に関して議論した。半導体デバイスは、従来のチップを多段に積層させる構造が主流となりつつある。第6章では、提案手法の積層構造への適用に関する基礎検討を実施し、積層構造で生じる超音波の共振を利用して提案手法の信号強度を向上可能なことを示した。加えて、振動子と試料の間の距離の調整により積層構造の厚さ方向への選択的な観察の可能性を示唆した。

第7章には、本論文の結論をまとめている。本論文では、提案手法の信号が超音波加熱に起因していることを明らかにし、半導体デバイスでの超音波の伝搬を考慮した適切な測定条件の選択により、測定系を変更せず提案手法の信号強度の向上が可能なことを示した。本論文で議論した提案手法の信号強度と超音波加熱との関係は、提案手法の実用化の検討における理論的な考察の基礎として寄与する。将来的に、提案手法と既存手法との相補的な運用が可能となれば、本論文の提案手法は半導体デバイスのより円滑な故障解析に貢献しうるものと期待できる。

Abstract

The decapsulation of mold resin is an important step in fault location process of semiconductor devices' chips. However, the decapsulation may lead to a deterioration of faults' reproducibility. For a rough fault location of the devices prior to the decapsulation, conventional methods of using magnetic field or heat generation have been proposed to observe current paths of semiconductor devices. This thesis proposes a method of using ultrasonic heating in order to locate faults with higher spatial resolution than the conventional ones. In chapter 4 to 6 of this thesis, three topics were discussed to study the effect of ultrasonic heating on the signal of the proposed method from the viewpoint based on the propagation of ultrasonic wave.

Chapter 1 of this thesis summarizes the objective and overview of this study. Chapters 2 explains the research background. Chapter 3 describes the principle and measurement system of the proposed method.

As the first topic, the study of chapter 4 discussed the possibility of current path observation with the proposed method of using ultrasonic heating. In common reports on measurement techniques with ultrasonic wave, there are almost no examples which make use of ultrasonic heating for observation of current paths as in the proposed method. In chapter 4, it was examined that the current paths can be visualized by using the proposed method. The results of experiment and calculation showed that ultrasonic heating causes the signal of the proposed method, and they also showed that the proposed method is able to visualize the current paths.

As the second topic, the study of chapter 5 discussed the observation of current paths by using ultrasonic heating through mold resin. In chapter 5, an experiment showed that current paths can be visualized by using the proposed method with ultrasonic heating through mold resin. From a discussion on resonance of ultrasonic wave, results of experiments and calculations showed that the proposed method has an optimal frequency of ultrasonic wave on mold resin thickness. The optimum frequency was estimated from the frequency components of reflected waves. A fault of a practical semiconductor device was clearly located with the estimated optimal frequency by using the proposed method. Additionally, the proposed method was applied to some cases of practical fault location.

As the third topic, the study of chapter 6 discussed the application of the proposed method to semiconductor devices with multilayered structure. The semiconductor devices are in a trend that they have a multilayered structure with stack of conventional chips. In chapter 6, a fundamental study was carried out to examine that the proposed method can be applied to the semiconductor devices having multilayered structure. An experimental result suggested that the signal intensity of the proposed method can be improved by appropriately tuning the frequency of ultrasonic wave based on the resonance in the multilayered structure. Further consideration suggested that the proposed method has a possibility of selective observation of chips on the depth direction of multilayered structure by adjusting the distance between the transducer and sample.

Chapter 7 concluded this thesis. This thesis showed that the signal of the proposed method is caused by ultrasonic heating. By appropriately choosing the condition of ultrasonic heating based on the propagation of ultrasonic wave in semiconductor devices, the signal intensity of proposed method can be improved without any changes on the measurement system of proposed method. The discussion of the effect of ultrasonic heating on the signal intensity will work as a theoretical basis for the implementation of the proposed method in practical use. If it is possible to use the proposed method with the conventional ones complementary, the proposed method will contribute to the smooth failure analysis of semiconductor devices in the future.

目次

目次	i
第 1 章 序論	1
1.1 研究目的と主要な論点	1
1.1.1 半導体デバイスの故障解析技術の概要と本研究の提案手法	1
1.1.2 研究の目的と位置づけ	2
1.2 学位論文の構成	3
第 2 章 研究背景と本研究の提案手法	5
2.1 現代産業における半導体デバイス	5
2.1.1 半導体デバイスの誕生	5
2.1.2 産業の基幹技術としての半導体デバイス	6
2.2 信頼性の意味と方法論	9
2.2.1 信頼性の意味	9
2.2.2 信頼性の方法論	13
2.3 半導体デバイスの信頼性の作り込み	16
2.3.1 故障物理に基づいた信頼性作り込み	16
2.3.2 半導体デバイスの故障解析	21
2.4 半導体デバイスの故障箇所絞込み技術と本研究の提案手法	23
2.4.1 チップ部の故障箇所絞込み	23
2.4.2 封止樹脂の開封前に適用可能な既存の故障箇所絞込み技術	26
2.4.3 本研究で提案する超音波加熱を利用した故障箇所絞込み手法	27
第 3 章 提案手法の原理と測定系	31
3.1 提案手法の原理	31
3.1.1 音響場と温度場の分布および抵抗変動	31
3.1.2 抵抗変動と電流変動の関係	32
3.1.3 典型的な電流経路からの信号	33

3.2	提案手法の測定系	36
3.2.1	電流経路の撮像	36
3.2.2	提案手法を用いた故障箇所絞込み	38
3.3	提案手法の測定系に関する文献調査	39
3.3.1	光加熱を利用した故障箇所絞込み手法に関する文献調査	39
3.3.2	パルス駆動型超音波顕微鏡に関する文献調査	41
第4章	電流経路可視化の基礎実験と数値解析	43
4.1	本章の目的と位置づけ	43
4.2	封止樹脂に覆われていない電流経路の可視化	44
4.2.1	本節の目的と内容	44
4.2.2	測定試料の構成と測定条件	44
4.2.3	実験結果	45
4.2.4	本節のまとめ	45
4.3	超音波加熱と信号強度の関係	45
4.3.1	本節の目的と内容	45
4.3.2	計算モデルの定義	46
4.3.3	結果と考察	50
4.3.4	本節のまとめ	52
4.4	本章のまとめ	52
第5章	封止樹脂を介した超音波加熱による電流経路の観察	53
5.1	本章の目的と位置づけ	53
5.2	封止樹脂に添加されている充填剤の影響	54
5.2.1	本節の目的と内容	54
5.2.2	測定試料の構成と測定条件	54
5.2.3	80 MHz の超音波を用いた測定	55
5.2.4	散乱体のサイズパラメータを用いた考察	55
5.2.5	40 MHz の超音波を用いた測定	56
5.2.6	本節のまとめ	58
5.3	封止樹脂の厚さと信号強度の関係	58
5.3.1	本節の目的と内容	58
5.3.2	測定試料の構成と測定条件	59
5.3.3	実験結果と考察	60
5.3.4	本節のまとめ	62

5.4	封止樹脂での超音波の共振と最適な測定条件	62
5.4.1	本節の目的と内容	62
5.4.2	封止樹脂の厚さと超音波の多重反射の関係	62
5.4.3	封止樹脂での超音波の共振を利用した信号強度の向上	68
5.4.4	本節のまとめ	70
5.5	反射波の周波数成分に基づいた共振周波数の推定	70
5.5.1	本節の目的と内容	70
5.5.2	共振周波数の推定方法	70
5.5.3	実験結果と考察	71
5.5.4	本節のまとめ	72
5.6	商用のデバイスでの超音波の共振を利用した故障箇所絞込み	72
5.6.1	本節の目的と内容	72
5.6.2	試料の構成	73
5.6.3	実験結果と考察	74
5.6.4	本節のまとめ	77
5.7	商用のデバイスでの故障箇所絞込みの例	77
5.7.1	本節の目的と内容	77
5.7.2	提案手法を用いた解析事例	77
5.7.3	空間分解能についての考察	80
5.7.4	本節のまとめ	82
5.8	本章のまとめ	83
第 6 章	積層構造への適用に関する基礎検討	85
6.1	本章の目的と位置づけ	85
6.2	積層構造での超音波の共振	86
6.2.1	本節の目的と内容	86
6.2.2	測定試料と測定条件	86
6.2.3	実験結果と考察	87
6.2.4	本節のまとめ	89
6.3	積層構造の厚さ方向への選択的な観察	89
6.3.1	本節の目的と内容	89
6.3.2	測定試料と測定条件	90
6.3.3	実験結果と考察	90
6.3.4	本節のまとめ	93
6.4	本章のまとめ	94

第7章	まとめと今後の課題	95
7.1	学位論文の総括	95
7.1.1	研究の目的	95
7.1.2	研究成果の要約	95
7.1.3	研究成果の寄与	97
7.2	今後の課題と展望	97
7.2.1	提案手法の適用限界に関する一検討	97
7.2.2	実用化の課題	101
7.2.3	提案手法の展望	102
	参考文献	103
	謝辞	115
	研究業績	117

第1章

序論

1.1 研究目的と主要な論点

1.1.1 半導体デバイスの故障解析技術の概要と本研究の提案手法

■半導体デバイスの信頼性と故障解析

半導体デバイスは広範な分野で応用されており，国際的な経済競争の下，より短納期での新製品開発に迫られている．しかし，工業製品としての信頼性の低下は許されず，相対的に，半導体デバイスには従来よりも高い水準の信頼性が求められている．

半導体デバイスの信頼性は，故障解析の活用により，故障の未然防止の視点に立った作り込みが実施されている．故障解析は，故障品の故障原因を究明し，解析結果から得られた対策を設計や製造などにフィードバックさせ，半導体デバイスの信頼性の向上だけでなく歩留まりの向上にも貢献している．図 1.1 には，半導体デバイスの故障解析の流れを模式的に示している．

■段階的な故障箇所絞込みと封止樹脂の開封前に伴う懸念

半導体デバイスの故障解析は，故障状況や使用履歴の把握に始まり，故障の原因の究明と対策の立案によって完結する．故障への対策の検討には，電子顕微鏡などを利用した物理・化学的な解析が必須となる．電子顕微鏡などで一度に観察可能な視野の大きさは，半導体デバイスの大きさに比べ極めて小さいため，故障解析を効率的に進めるには，段階的に故障箇所を絞込むための計測技術が重要な役割を果たす．

半導体デバイスのチップ部における段階的な故障箇所の絞込みには，事前に封止樹脂の開封作業が必要になる．しかし，封止樹脂の開封は，チップを傷つけ故障の再現性を低下させる恐れがあり，細心の注意と多大な労力を払って実施される．

■封止樹脂の開封前に適用可能な既存技術と本研究で提案する超音波加熱を利用した故障箇所の絞込み

封止樹脂の開封前に故障箇所を把握できれば，限定的な開封が可能となり，開封作業の労力の低減と円滑な故障箇所の絞込みが可能となる．封止樹脂の開封前に適用可能な既存の故障箇所絞込み技術として磁場や発熱を利用する手法が提案されているが，空間分解能はあまり高くない．既存手法よりも高い空間分解能での故障箇所の絞込みを可能とするために，本研究では超音波加熱を利用した手法を提案する．

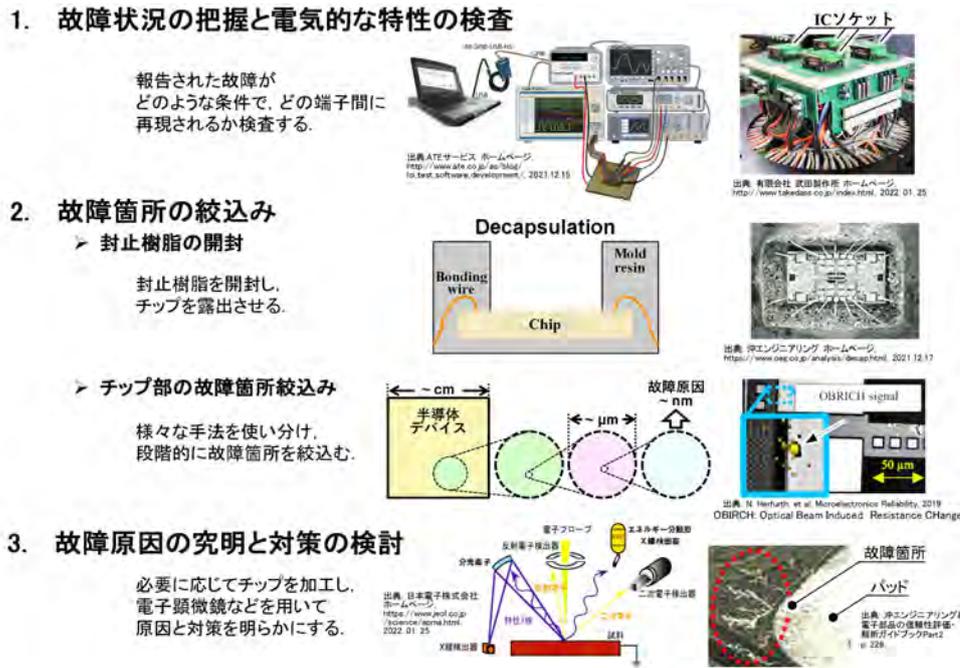


図 1.1: 半導体デバイスの故障解析の流れ.

1.1.2 研究の目的と位置づけ

本論文では、計測技術としての提案手法の信号と超音波加熱の関係に対する波動の伝搬に基づいた検証を目的として研究を実施した。

図 1.2 には、超音波加熱を利用する提案手法についての、本学位論文の研究の位置づけを示す。本学位論文は、提案手法の実用化へ向けた研究の前段階と位置づけており、図 1.2 中に示す三つの主要な論点に関する研究成果についてまとめている。

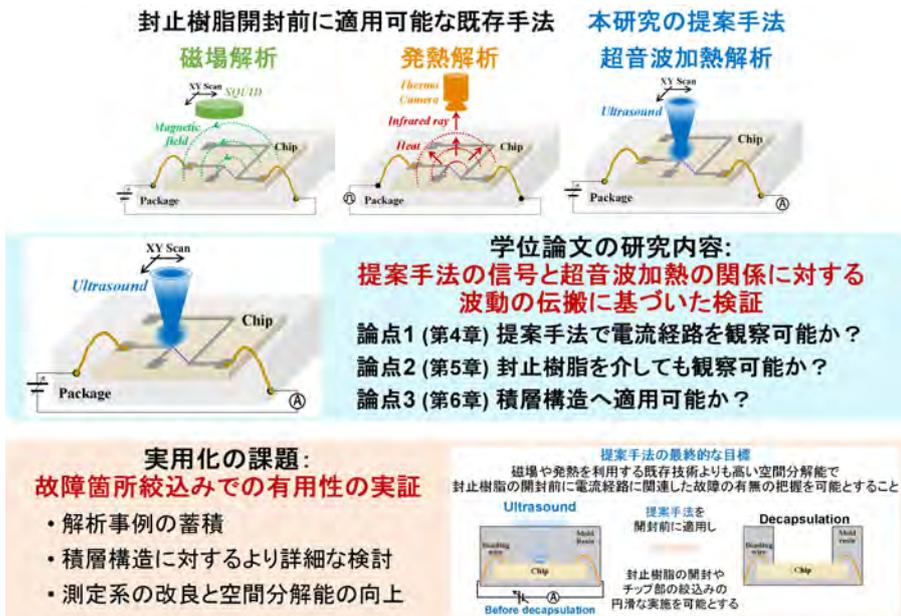


図 1.2: 学位論文の研究の位置づけ.

1.2 学位論文の構成

本学位論文は、七つの章から構成されている。第1章の本章では、序論として研究目的を端的に述べ、提案手法に関する研究の中での学位論文の位置づけと学位論文の構成を示す。第2章では、研究背景についてまとめている。第3章では、本研究の提案手法の原理と測定系についてまとめている。

第4章、第5章、第6章では、学位論文の具体的な研究内容について議論している。第4章では、超音波加熱による電流経路の可視化と信号強度の関係の検証を目的とした議論についてまとめている。第5章では、半導体デバイスの封止樹脂を介した超音波加熱による電流経路の可視化と、樹脂での超音波の伝搬に基づいた提案手法の最適条件について議論している。第5章では加えて、故障が確認された商用の半導体デバイスでの故障箇所絞込みへの提案手法の適用についても議論している。第6章では、積層構造を有する半導体デバイスに対する故障箇所絞込みへの提案手法の適用に関する基礎検討について議論している。

第7章では、まとめと今後の課題として、本学位論文の研究成果の総括と、適用限界についての考察をまとめ、提案手法の実用化の課題について言及している。

第 2 章

研究背景と本研究の提案手法

2.1 現代産業における半導体デバイス

2.1.1 半導体デバイスの誕生

2.1.1.1 トランジスタの登場

半導体デバイスの研究開発の発端は、第二次大戦中の米国にあるとされる。当時の軍事機器には、多数の真空管が使用されていたが、出荷時に良品でも運搬中に故障し多くの軍事機器が使い物にならなかった。この対策として米国で高信頼性真空管の開発が始まり、トランジスタ誕生のきっかけとなった [1]。

1947 年 12 月に米国ベル研究所の J. Bardeen と W. Brattain が点接触型トランジスタを発明し、1948 年 1 月に同研究所の W. Shockley が接合型トランジスタを発明したことで、消費電力が大きく大型で故障率も高かった真空管に替わる新たな電子部品としてトランジスタが用いられるようになった [2, 3]。

2.1.1.2 IC および CMOSFET の登場

応用先の大規模化と複雑化に伴う部品点数の増加とその部品間の相互結線数の増加の問題を解決するために、半導体集積回路 (IC: Integrated Circuit) が開発されることになる。1958 年に米国 Texas Instruments 社の J. Kilby が IC に関する基本特許を、1959 年に米国 Fairchild 社の R. Noyce がプレーナ方式に関する特許を提出し、IC の実用化のきっかけを作った [4]。

電界効果トランジスタ (FET: Field Effect Transistor) の概念の誕生は、1926 年頃に J.E. Lilienfeld から出願された特許にあるとされており、Bell 研究所の J. Attala と D. Kahng が MOS (Metal Oxide Semiconductor) 形 FET の安定動作に成功したことを 1960 年に発表した [5]。MOS 形 FET は、半導体の表面技術が確立されていく過程で、バイポーラトランジスタに比べ製造工数が少ないため、IC に急速に採用されていった [5]。IC が大規模になるにつれ低消費電力化の要求が高まり、CMOSFET (Complementary MOSFET) が採用されるようになった。現在では、CMOS 回路以外で IC を構成するのは稀なほど、幅広い分野で利用されている。

2.1.2 産業の基幹技術としての半導体デバイス

2.1.2.1 多様な分野に応用される半導体デバイス

■半導体デバイスのその後の発展

トランジスタ、IC、MOSFET、CMOS回路の登場により、より小型でより多機能かつ高性能な半導体デバイスの開発が世界中で進められている。

半導体デバイスの小型化や多機能化などが進むことで、半導体デバイスを利用する電子機器においても同様な方針の開発が加速した。今日では計算機や情報通信機器および一般家電製品のみならず、産業用機器・自動車部品・医療用機器・航空宇宙関連など多様な分野の工業製品に半導体デバイスが応用されている。

■半導体デバイスの市場規模

図 2.1 に、半導体デバイスの年間出荷数の推移を示す [6]。半導体デバイスの一年当りの出荷総数は一兆個を超えている。出荷総数は増加傾向にあると見込まれている。

図 2.2 に近年の半導体デバイスの市場統計と 2019 年の市場予測を示す [7]。2014 年から 2021 年までの 7 年間で市場規模は約 2 倍に拡大していることが読み取れる。市場規模は今後も拡大が見込まれている。

図 2.3 に半導体デバイスの最終製品別の市場規模を示している [8]。計算機・情報通信機器が占める市場規模は依然として大きい。しかし、図 2.3 より、電気自動車や自動運転および IoT 等への関心の高まりから、自動車や産業機器向けの市場の成長が顕著なことも読み取れる。

以上の統計資料からだけでも、半導体デバイスは、民生機器のみならず、情報通信・自動車・産業機器など、社会や生活の基盤を支える工業製品で幅広く利用されていることがわかる。

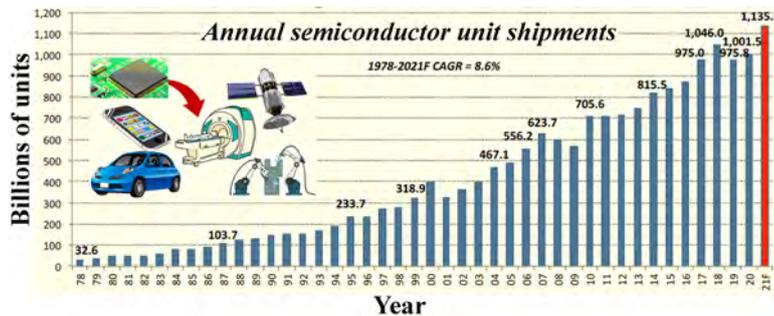


図 2.1: 半導体デバイスの年間出荷数. 引用: ICinsight [6].

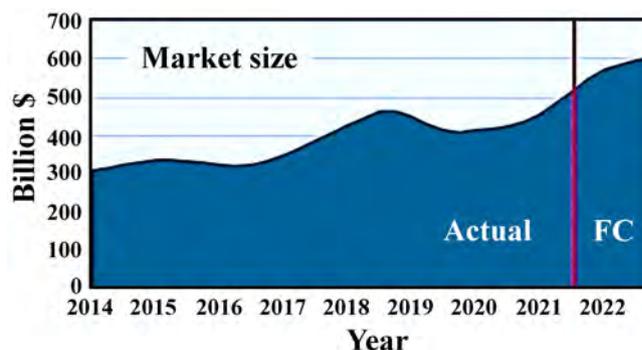


図 2.2: 半導体デバイスの市場規模. 引用: WSTS [7].

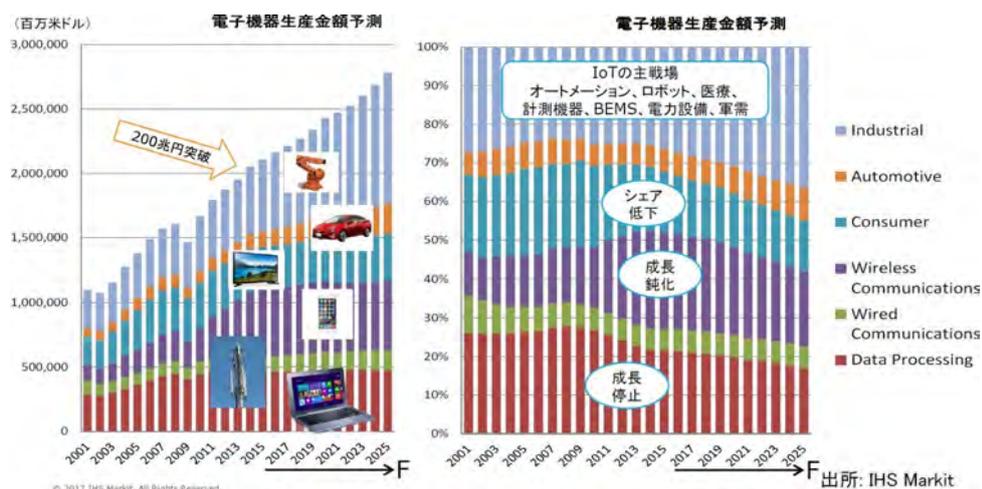


図 2.3: 半導体デバイスが利用されている工業製品の市場規模。引用: IHS Markit [8]。

■半導体関連技術を基盤とした将来のエコシステム

図 2.4 には、International Roadmap for Devices and Systems (IRDS) の 2020 年版の調査報告書の、半導体関連技術に基づいた新たなエコシステムを示す [9]。人工知能や IoT などを活用した情報技術が、現代社会を支える重要な技術としての地位を得つつある。2020 年版の IRDS の調査報告 [9] においては、これら情報技術の社会実装は今後もより一層加速するとみられている。

図 2.5 には、Cisco 社が調査した、情報通信におけるトラフィック量の行先別の比率の予測を示している [10]。図 2.5 は、2016 年に出された予測に過ぎないが、全世界でのトラフィック量の約 77 % がデータセンター内で生じるものであることを示している。この統計資料から、世界の情報通信を支える主体は、スマートフォンなどの携帯端末ではなく、データセンター等の社会インフラ設備にあることが読み取れる。情報技術の更なる発展のためには、ハードウェアとしてデータセンターなどを支える半導体デバイスが重要な技術となる。

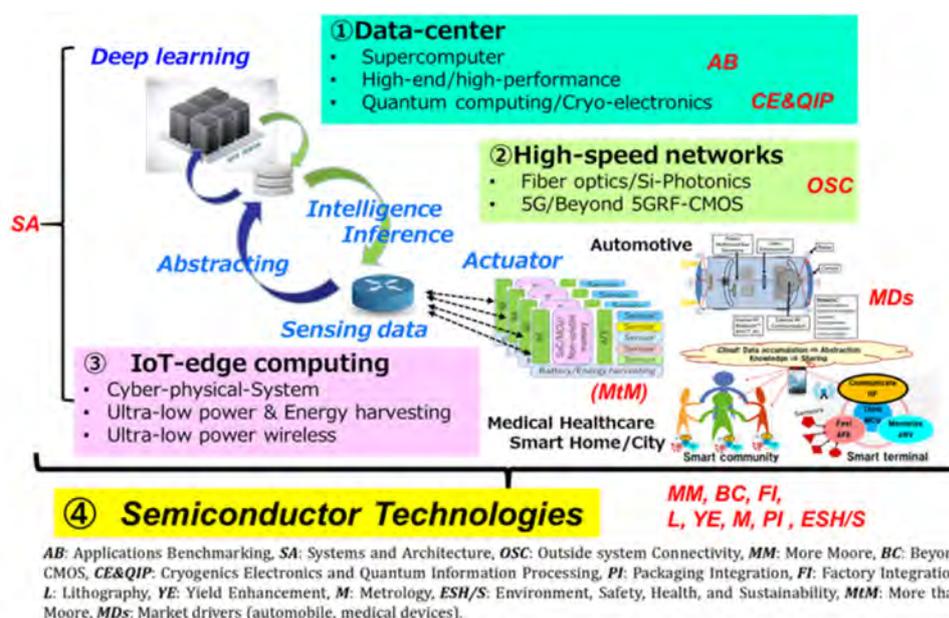


図 2.4: 半導体技術を基盤とした未来のエコシステム。引用: IRDS report 2020 Edition [9]。

Global Data Center Traffic by Destination, 2020

Most Data Center Events/Content Stays Within the Data Center

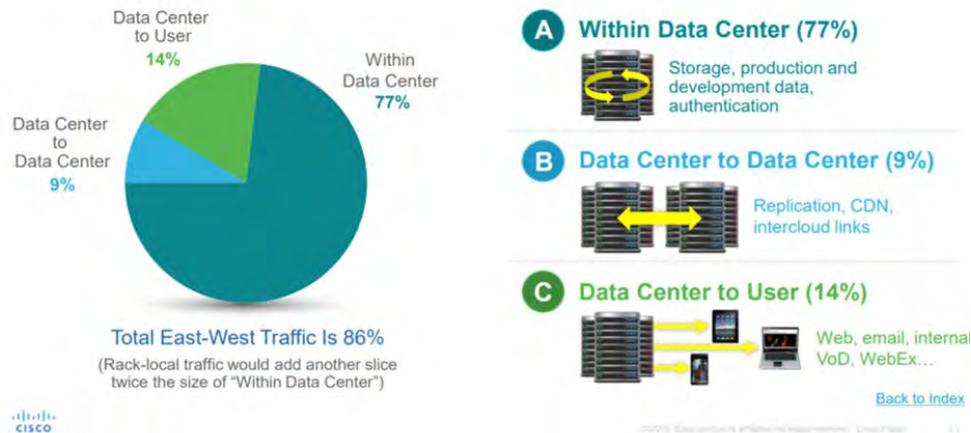


図 2.5: 転送先で分類したデータトラフィック量の比較. 引用: Cisco Cloud Index 2015 - 2020 [10].

2.1.2.2 半導体デバイスに求められる信頼性

■基幹技術として高い信頼性を求められる半導体デバイス

産業の基幹技術の役割を担う半導体デバイスには、高い信頼性が要求される。データセンターなどは、管理会社が経済性を維持できる期間だけ稼働し続ける必要がある。データセンター等を構成する半導体デバイスには稼働率を高く維持するために、高い信頼性が求められる。自動車や産業用機器などに故障が生じた場合、周囲に影響を及ぼす大きな事故につながりかねない。車載用や産業用に応用される半導体デバイスにも、用途に見合った高い信頼性が求められる。

基幹技術としての半導体デバイスには、信頼性を高く維持することが求められる。

■半導体デバイスに対する矛盾した要求 [11]

半導体デバイスの信頼性を高く維持するうえでの技術的な困難さは、デバイスの微細化や高性能化などに付随する内部構造の物理的な要因だけではない。メーカ各社がグローバルな経済競争に曝されていることもその主要な要因に数えられる。企業の競争力の維持には、短納期かつコストを抑えた開発が要求される。加えて、半導体業界全体で水平分業が進んでおり、製品開発に複数社が関わる場合にどのように信頼性を担保するかというも課題として挙げられる。

以上のような複雑な状況のなか、信頼性の低下は許されず、半導体デバイスには相対的に従来よりも高い水準の信頼性が要求されている。

2.2 信頼性の意味と方法論

2.2.1 信頼性の意味

2.2.1.1 品質保証の枠組みの中での信頼性

■信頼性の生い立ち [12]

信頼性という概念の誕生のきっかけは第二次大戦中にあり、信頼性に関する工学的な考え方や方法論の発展は、半導体デバイスの発展と密接に関係している。

1940年代に、信頼性に関する本格的な研究が第二次大戦中の米国で開始された。第2.1.1節ですでに述べたように、高信頼性真空管に関する研究開発を起点として、半導体デバイスが創り出された。その後、米国は、朝鮮戦争においても信頼性に関して苦い目にあっており、より本格的に製品の高信頼化に取り組むことになる。

1950年代には、装置やシステムの構成要素の信頼性の改善だけでは全体の信頼性は向上せず、システム全体を俯瞰したアプローチの必要性が認識され、米国において基礎的な研究が組織的に進められていた。このような背景から、1952年から1957年にかけて米国国防省の研究諮問グループ (AGREE: Advisory Group on Reliability of Electronic Equipments) の研究成果がまとめられた。この研究成果の中には、信頼性の考え方や信頼性の向上の方策などが盛り込まれており、以降の信頼性に関する研究のよりどころになったと言われている。

1960年代に入ると、米国のミサイル開発やアポロ計画などの進展とコンピュータ技術の発展に伴って信頼性の理論と手法の研究が進み、体系が確立されていった。一般消費者の目線では、1960年代においてリコール制度と製造物責任問題に注目が集まっており、米国では1966年に、日本では1969年に、初めて自動車のリコールが実施された。加えて、1969年のアポロ11号の打ち上げと月探検の成功が、信頼性の概念を一般にも浸透させるきっかけとなった。

以上のような歴史的な経緯で、信頼性に関する研究は半導体デバイスとその応用製品の発展とともに進歩してきた。現在では、信頼性の概念は半導体デバイスの分野に限らず多様な工業製品に応用されている。

■品質保証の生い立ち [13]

品質保証の考え方は信頼性よりも古く、1910年前後に起きた品質管理の考え方の転換にまで遡る。

1910年前後、H. Ford がフォードシステムと呼ばれる自動車の大量生産方式を完成させた。この少し前には、科学的管理の父と呼ばれる F.W. Taylor が、作業員個々人の仕事の進め方の最適化を模索し、米国における新しい生産方式の確立に大きな貢献を果たしていた。これらの歴史的出来事を転機として、それまでは一連の作業として実施されていたものが、いくつかの工程で分割された流れ作業として実施されるようになった。

F.W. Taylor と H. Ford の登場以前の個別生産方式においては、製品の品質は作業員の技能と厳しい検査によって維持されていた。しかし、近代化された生産方式で工業製品が一度に大量に生産されるようにな

ると、個別生産方式での品質管理が間に合わず新たな方法が必要となってきた。

1920年代になると、W.A. Shewhart が、大量生産方式における統計学的な品質管理手法の概念を提唱し、その実現のための手段として統計的管理図を1924年に導入した。

1930年代になると、W.A. Shewhart が提唱した統計的品質管理の考え方の重要性が米国の産業界においてよく理解されるようになった。

1940年代になって第二次大戦が始まると、米国政府は多種・多量の製品を良い品質で民間企業から経済的に調達する必要に迫られた。この目的の達成には、製造業に W.A. Shewhart の統計的品質管理を啓蒙・定着させることが有用であると米国政府が気が付き、統計的品質管理が全米的な規模で導入された。

日本には戦後の1950年前後に、統計的品質管理が導入された。戦後の疲弊しきった産業の復興のため、全国規模で導入されていった。その後、W.A. Shewhart が提唱した統計的品質管理は、米国と日本でそれぞれの国の社会的・経営的環境や文化的風土に影響され独自に発展していった。

1960年代になると、貿易自由化の問題と消費者主義の台頭により日本の品質管理は大きな転機を迎えた。壊滅状態にあった戦後の日本の産業は通産省の保護政策の下に復興をはかっていたが、1960年代に入り当時の工業先進国から貿易の自由化を迫られていた。日本の各工業界では、自由化によって国際的な経済競争に曝されるなか、いかにして日本企業の競争力を維持するかが喫緊の課題となっていた。一方、技術の高度化が進み複雑・高機能な製品やシステムが日常生活に浸透したことで、消費者の安全性を製造者側が保証すべきという消費者主義が生まれた。高度な技術に支えられた社会において、消費者が市場で品質を簡単に判断できない製品に対し、どのように品質を保証するべきかという問題が浮上していた。

以上のような歴史的な流れの中で、1960年代前後にかけて品質保証の概念が芽生え体系化されていくこととなった。

■製造物責任問題および品質保証と信頼性の一本化 [14]

信頼性と品質保証は異なる概念として発生し、個別の発展を遂げてきた。とくに米国では、「品質保証は”manufacturing”、信頼性は”engineering”」と区別されていた。しかし、品質保証と信頼性は、1970年代以降では消費者主義・リコール制度・製造物責任問題をきっかけに一本化されていく。

1960年代の初頭から、鉄道等の社会インフラも大規模システムに大きく依存するようになり、消費者が「買い手責任」として製品の品質や信頼性を判断することが困難になり始めていた。製造者側に「売り手責任」として製品の品質や信頼性を保証することを求める製造物責任の考え方が現れた。

製造物責任の考え方では、販売された製品の品質上の欠陥が原因で消費者が損害を被った場合、製造者に賠償責任が課せられる。製造物責任の考え方は、米国では1960年代に、欧州では1980年代に、日本では1990年代に法律に取り入れられた。

製造者が製造物責任問題を回避するには、消費者が損害を被る原因、つまり、製品の事故・故障を未然に防止するための活動を品質保証の中に取り入れる必要がある。この活動は信頼性を中心に据えた品質保証の活動となる。以上の背景より、1960年代後半から、品質保証と信頼性の一本化が推し進められていった。

■品質の構成要素としての信頼性 [15, 16]

品質保証と信頼性は、社会が発展し高度な技術に大きく依存するようになった歴史の流れの中で、生れ、発達し、一本化されてきた。工業製品の品質の観点から、信頼性の概念について整理する。

図 2.6 に、品質の構成要素を示す。品質とは、有用性、信頼性、安全性の三つの要素からなる。有用性は、機能特性、心理特性、適合性からなる。信頼性は、耐久性、冗長性、保全性からなる。安全性は、人に何らかの損害を与えうる危害の発生頻度とその危害の影響の大きさの組み合わせで評価される。危害の発生頻度が低く、危害の影響が小さいほど、安全性が高い状態にあると言える。有用性と信頼性の構成要素の概要について以下に列記する。

機能特性

速さや周波数帯域などの、物理計測によって客観的に評価できる特性を指す。

心理特性

美しさや乗り心地などの、使用者の主観によって評価される特性を指す。

適合性

製品価格などの、使用者の目的に合致するかによって評価される特性を指す。

耐久性

狭義の信頼性とも呼ばれている。摩耗/経時劣化の進行が緩いなどの繰り返して生じるストレスに対する強さを指す。故障が生じるまでの寿命という意味で、時間の関数として評価される。

冗長性

使用の信頼性とも呼ばれている。系の並列化や、突発的な故障を系全体へ波及させない工夫 (フェールセーフ)、人間の誤操作への対策 (フルプルーフ)、系の限界値を超えたストレスへの対応 (保護回路等) を取り入れ、系を冗長化させることを指す。系の冗長さの度合いの意味で、時間に依存しない要素として評価される。

保全性

保全は、整備や保守や検修などとも呼ばれている。品質の定期的な点検、故障を事前に予知する活動、故障の修復をより勘弁にする工夫などからなる。系がどのくらい正常状態を維持できるかという意味で、時間の関数として評価される。

図 2.6 中には、有用性、信頼性、安全性に対する品質保証の適用範囲も示している。有用性と信頼性は、製品の開発側が意図した使用環境におかれた場合にのみ品質保証が適用される。しかし、安全性は、悪意をもった改造が施された場合などを除き、開発側が意図していない使用環境においても、その環境が合理的に予見可能な場合には品質保証が適用される。合理的に予見可能とは、明確な規定があるわけではないが、「操作の簡略化のために、機械の安全装置が勝手に外されてしまう」などの場合を指す。

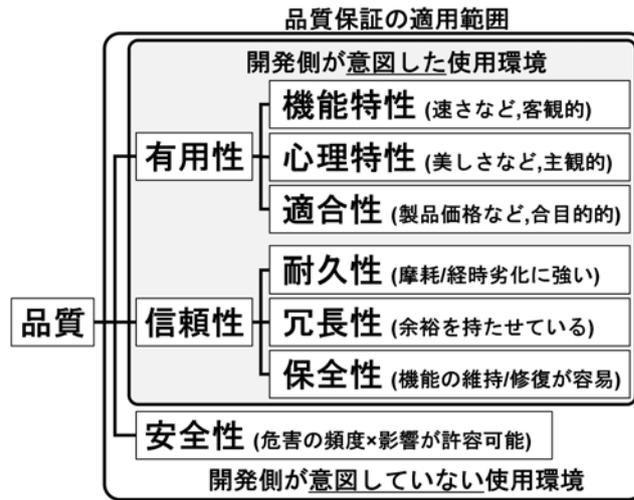


図 2.6: 品質の構成要素.

2.2.1.2 複雑なシステムの安全性を下支えする信頼性 [17-21]

■信頼性と安全性の意味の比較

リコール制度や製造物責任問題を背景として工業製品の品質に対する考え方は歴史と共に変化してきた。大衆向けの一般消費財から電力供給網のような大規模社会インフラに至るまで、我々の生活は高度に技術化された数多の工業製品に支えられている。社会が高度かつ複雑な技術に大きく依存するに従い、製品の信頼性と安全性への関心が高まってきた。

信頼性と安全性の意味を比較すると、信頼性は「故障せずに動作し続けるられるか」が重要であり、安全性には「動作/故障状態に関わらずリスクは許容可能か」が重要である。

■製品の状態から見た信頼性と安全性の区別

表 2.1 に、信頼性と安全性の観点からみた製品の状態の分類を示す。表 2.1 は、参考文献 [16] p. 14 を元に作成した。信頼性において考察の対象となる状態は、動作状態と故障状態の二つである。安全性において考察の対象となる状態は、安全と危険である。

安全設計や安全装置まで含めたシステム全体として考えた時、構成要素の信頼性の向上は安全性の向上にも寄与する。信頼性と安全性は独立した概念でありながらも、技術が高度化・複雑化した現代社会においては互いに密接に関連している。工業製品を大きなシステムとしてとらえた時の安全性は、システムの構成要素一つ一つの信頼性に影響を受ける。

工業製品の信頼性を高い水準で作り込むことは、技術の高度化・複雑化が進んだ現代社会の安全性を下支えするうえで重要な役割を持つことになる。

表 2.1: 信頼性と安全性の比較.

		信頼性	
		動作状態	故障状態
安全性	安全	機能が保たれており、 かつ、リスクが許容可能 例: 開発側が意図した使用 環境下にある多くの製品	機能が損われているが、 リスクは許容可能 例: 信号機の赤だけが点灯、 災害時の鉄道の運航休止。
	危険	機能は保たれているが、 リスクが大きい 例: 包丁、シュレッダー、 自動ドア、回転扉、自動車	機能が損われており、 かつ、リスクが許容不可能 例: 航空機のエンジントラ ブル、原発のメルトダウン。

2.2.2 信頼性の方法論

2.2.2.1 工業製品の信頼性の作り込み [22, 23]

■企業の競争力のカギとなる信頼性技術

企業は、価格や技術開発の厳しい競争に曝されており、より優れたものをより安くより早く市場に投入する必要に迫られている。

信頼性に関する技術の積み上げが未熟だと設計変更が散発して開発に遅れが生じ、企業の競争力の致命的な低下を招く。開発の期間を短くし、コストを抑え、企業の競争力を維持するには、信頼性に関する技術の不断の積み上げが重要となる。

■故障の再発防止と未然防止

信頼性に関する技術の積み上げの活動には、2つの視点がある。故障の再発防止と未然防止である。工業製品に生じた故障の原因を追究し同種の故障が生じぬよう是正措置を講ずる一連の活動は、再発防止と呼ばれる。故障が顕在化して問題が起きる前に故障の発生を予測してその発生要因を分析し、故障とそれが引き起こす重大な事故などを未然に防ぐための活動は、未然防止と呼ばれる。

再発防止は、故障が生じた後から始まる活動であり、しばしば対処療法的な実施で済まされてしまうことがある。再発防止が正しく実施されているように見えても、生じた故障の要因のみを単に除去するだけでは、本質的な解決にはなりえない。生じた故障を二度と起こさせないためには、再発防止のみならず未然防止の視点に立った信頼性の作り込みが重要になる。

■故障の未然防止を目的とした攻めの役割

信頼性についての研究は、故障を少なくするための科学的な管理技術の体系として20世紀の中頃から発達してきた。その生い立ちと工業製品の重大な事故の事例に影響を受け、信頼性に関する技術は、故障の再発防止を目的とした守りの役割だけを強調されていることが少なくない。

しかしながら、信頼性に関する技術は、故障の未然防止を達成し企業の競争力を維持するために、新製品開発を裏で支える重要な攻めの役割も担っている。

2.2.2.2 信頼性の作り込みの方法論 [24, 25]

■信頼性七つ道具

未然防止の視点に立った信頼性作り込みの方法論として、2008年に、鈴木らによって信頼性七つ道具 (R7) が提唱された [24]。信頼性七つ道具は、(1) 信頼性データベース、(2) 信頼性設計技法、(3) FMEA/FTA、(4) デザインレビュー、(5) 信頼性試験、(6) 故障解析、(7) ワイブル解析からなる。

図 2.7 は、信頼性七つ道具の構成要素の相互の関わりを模式的に示している。信頼性七つ道具は、故障の発生を予測するための演繹的な 3 つのアプローチ (2) 信頼性設計技法、(3) FMEA/FTA、(4) デザインレビューと故障要因を分析するための帰納的な 3 つのアプローチ (5) 信頼性試験、(6) 故障解析、(7) ワイブル解析が (1) 信頼性データベースにより有機的に関連付けられた、故障の未然防止を促進させるための方法論である。信頼性七つ道具は、研究開発・設計の段階のみならず、市場調査から廃棄に至るすべての段階で適用される。

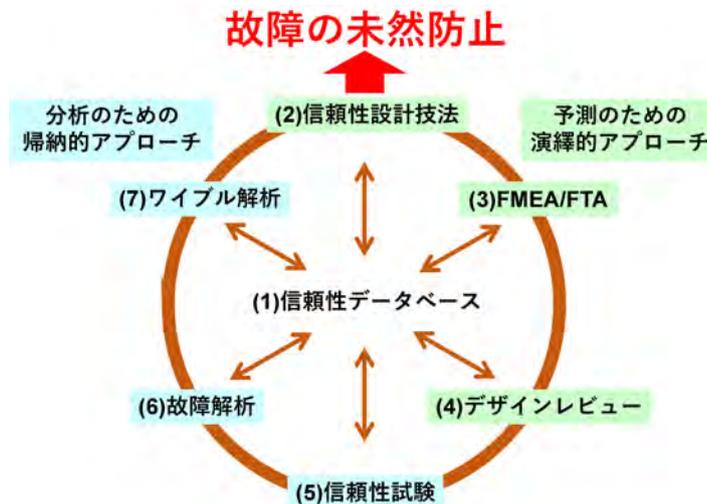


図 2.7: 信頼性七つ道具の活用による故障の未然防止。

■(1) 信頼性データベース

信頼データベースは、信頼性作り込みに有用な過去の知見を集めたデータベースのことを指す。過去の技術情報や失敗に関する情報、技術・品質標準や、部品・システム等に関する使用環境条件-故障-故障メカニズム-故障モードの関連などを収録している。

信頼性データベースは、後述の 6 つのツールを有機的に関連付け、信頼性七つ道具の基盤となる。

■(2) 信頼性設計技法

信頼性設計技法は、目的とする信頼性を達成するための設計技術やそのために行う設計上の工夫のことを指す。信頼性設計技法は大きく二つの要素で構成されている。信頼性設計技術と信頼性予測モデルである。

信頼性設計技術は、単純化・標準化・共有化や冗長設計などからなる。信頼性予測モデルは、信頼性ブロック図やアレニウス則・ワイブル分布を用いた数理統計的な寿命分布モデルなどからなる。

しばしば、製品の信頼性は設計段階で決まるといわれる。故障の発生を可能な限り抑え、高い信頼性を実

現するには、信頼性設計技法に基づき設計段階で信頼性を作り込む必要がある。

■(3) FMEA/FTA

FMEA/FTA は、製品の設計・開発の源流において後々生じうる問題を予測するために用いられる手法である。FMEA(Failure Mode and Effects Analysis) は故障モード・影響解析、FTA(Failure Tree Analysis) は故障の木解析のことである。

FMEA(故障モード・影響解析) は、ボトムアップ型の方法となっており、システムの構成要素の一つ一つが上位システムに及ぼす影響を検討する。FTA(故障の木解析) は、トップダウン型の方法となっており、システムとして起きてはならない事象をまず特定し、その原因を掘り下げて検討する。

FMEA/FTA を用いることにより、有限な時間の中で実施される設計・開発において、想定しうる状況の中でより重要な問題に的を絞った効率的な検討が可能となる。

■(4) デザインレビュー

デザインレビューは、完了した設計についての見直しのことを指す。設計上の不具合を見つけ出すために、設計工程の節目ごとに関連部署の専門家を集め、会議形式で実施される。

設計・開発の初期で実施されるデザインレビューでは、設計上の重要な点を後々の工程に伝えるフィードフォワード的な側面が強い。一方、設計・開発の後期では、設計上の問題点を明らかにし前の工程へ報告するフィードバック的な側面が強くなる。

技術の高度化により製品の機能はますます複雑化・多機能化している。担当技術者の知識と経験だけでは新技術や未知の問題への対処を十分に実施できない恐れがある。デザインレビューの目的は、多くの専門家集団の見識の統合によって先述の難点を克服し、製品の設計水準を向上させることにある。

■(5) 信頼性試験

信頼性試験は、製品の信頼性を設計・開発の源流から保証していくための手段のことを指す。製品の設計・開発のすべての工程に対して、信頼性の改善を促すために実施される。

設計・開発の初期では、当座の設計に内在する故障や信頼性上の弱点を明らかにし、使用限界の把握や設計目標/設計余裕の検証等を目的として実施される。設計・開発の後期では、主に、実使用条件下における設計目標の達成度や妥当性を検証するために実施される。製品の出荷後にも、故障品の故障の再現や故障への対策の効果の確認、生産中の製品の信頼性の実証等を目的として実施される。

信頼性試験の結果は、材料・部品の使用期限や故障メカニズム、設計の妥当性の確認など、企画から廃却までの各段階での活動に必要な情報を提供する。

■(6) 故障解析

故障解析は、故障の原因の解明を目的として実施される一連の活動のことを指す。複雑な機器やシステムにおいては、故障の表面的な現象だけを観察してもその根本原因を究明できない。故障解析は、顕在化した故障を出発点として故障の根本原因を明らかにし、その故障への対策が定まったときはじめて完了する。

故障解析は、製品の出荷後のみならず、製品の研究開発から市場での運用に至るまで、あらゆる段階で実

施される。製品が市場に出る前に実施される(事前)故障解析は、故障の未然防止に寄与する。製品が市場に出た後に実施される(事後)故障解析は、故障の再発防止に寄与する。

故障解析で得られた知見は、故障が確認された段階へのみフィードバックされるにとどまらない。解析結果を信頼性データベースに蓄積することで、故障解析は、将来において実施される製品開発の信頼性の作り込みに対しても貢献できる。

■(7) ワイブル解析(寿命データ解析)

ワイブル解析(寿命データ解析)は、統計学的手法によって製品が目的の信頼性に達しているかを定量的に評価し、製品の信頼性を予測するために実施される。寿命データとは、「時間」「回数」「走行距離」などの故障が生じるまでに記録された内容と生じた故障の原因とを対応させたデータセットのことを指す。寿命データの解析において、ワイブル確率紙を用いた解析が頻繁に実施されていたためこの名前が付けられた。

ワイブル解析の結果より、実使用条件下での製品の寿命や故障率を推定でき、製品の信頼性が予測できる。予測された信頼性から、製品が適切に設計されているか定量的に評価でき、設計を定量的に評価することで、設計の具体的な修正や変更が行える。信頼性試験とワイブル解析を実施しその結果を設計にフィードバックすることで、より高い水準での信頼性の作り込みが可能となる。

2.3 半導体デバイスの信頼性の作り込み

2.3.1 故障物理に基づいた信頼性作り込み

2.3.1.1 半導体デバイスの複雑な故障物理

■故障の意味 [26]

JIS Z 8115:2019 に則って、故障の定義についてまとめる。図 2.8 は、故障の観点から観た製品の状態の移り変わりを模式的に示している。図 2.8 は、参考文献 [26] p. 323 を元に作成した。市場に投入され使用を開始された製品は、2つの状態に分類される。動作状態と故障状態である。動作状態は、製品が正常に稼働し、要求されたとおりの動作をしている状態を指す。故障状態は、製品が要求された動作を達成できない状態を指す。動作状態から故障状態へと状態が遷移するときに発生する事象のことを故障と呼ぶ。

故障を物理的に考察する場面において、製品は故障原因を潜在的に内在させているという観点から始める。製品に内在する故障原因は、環境ストレスや動作ストレスの影響を受け、故障メカニズムとして発展していく。内在する故障原因が、故障メカニズムとして発展し、ある時、故障が生じると、その故障は故障モードとして顕在化する。



図 2.8: 故障に関する用語の関連.

■故障モードの種類の少なさ [27, 28]

図 2.9 は、故障が生じた半導体デバイスの構成要素と、その故障の主だった顕在化の仕方 (故障モード) の関連について概念的に示している。図 2.9 は、参考文献 [27] p. 14, および、参考文献 [28] p. 10 を元で作成した。図 2.9 に示すように、半導体デバイスの構成要素を概念的に大別すると、チップ部には素子と絶縁膜と配線が属し、パッケージ部にはワイヤボンダや封止材が属す。半導体デバイスは電子部品の一つであるため、その機能は何らかの電気的な方法で観察される。電気的に観察される結果を慣習的に大別すると、図 2.9 にあるような 5 つとなる。その 5 つは、(1) 開放、(2) 高抵抗、(3) 短絡、(4) リーク、(5) 動作不良である。

(1) 開放、(2) 高抵抗、は、通電することが期待される端子間に電流が流れない状態をいう。開放と高抵抗の区別は厳密ではないが、ほとんど電流が流れない状態を開放とよび、流れはするが電流値が期待するものよりも小さい場合を高抵抗とよぶ。

(3) 短絡、(4) リーク、は、通電しないことが期待される端子間に電流が流れてしまう状態をいう。短絡とリークの区別も厳密ではないが、ある程度の大きさの電流が流れはっきりと通電が確認される状態を短絡とよび、流れている電流はさほど大きくないが通電していないとするには大きすぎる電流が流れている状態をリークとよぶ。

(5) 動作不良は信号遅延の増大やクロストーク、トランジスタの特性バラつき等の上記 4 つに分類されないものを指す。半導体デバイスが電子部品としては非線形素子に分類され、動作周波数が広い帯域にわたっていることなどから、動作不良には様々な故障モードが該当する。

半導体デバイスのそれぞれの構成要素で生じた故障は、上記五つの全ての故障モードとして顕在化する可能性がある。したがって、外部から観察される故障モードと故障箇所および故障原因の組み合わせは一意的に定まらない。これが、半導体デバイスの故障の未然防止において、故障への対策の検討を難しくしている理由の一つである。

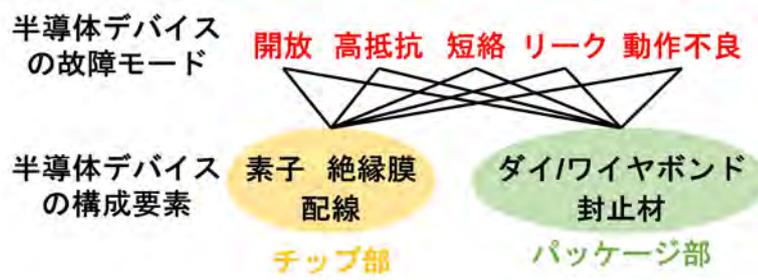


図 2.9: 半導体デバイスの構成要素と故障モードの関係。

2.3.1.2 半導体デバイスの信頼性作り込みの難しさ

■新たな製造技術の導入が招く新たな信頼性問題 [29–34]

半導体デバイスの発展の歴史は、半導体デバイスの高性能化・高密度化を目的とした技術開発の歴史と捉えることが出来る。この技術開発は、チップ及びウェハ工程に関する技術と、パッケージ及びアセンブリ工程に関する技術とでそれぞれに発展してきた。

チップ及びウェハ工程に関する技術の発展は、主に、トランジスタの微細化や新材料の導入によって進められている。パッケージ及びアセンブリ工程に関する技術の発展は、主に、チップの高集積化や多ピン化などによって進められている。しかし、以上のような半導体デバイスにおける新技術の導入は、信頼性に関し新たな問題が顕在化する危険性を常に孕んでいる。

チップ部の技術に関する信頼性の問題の有名なものには、微細化が挙げられる。半導体デバイスの高性能化・高密度化に対する種々の要求が、微細化に伴い電界や電流密度の局所的な集中を招いている。チップ内部での電界や電流密度の局所的な集中は、厳しい動作ストレスの一つとして多様な故障メカニズムをよりいっそう加速させている。

パッケージ部の技術に関する信頼性の問題の有名なものには、鉛フリー化が挙げられる。環境負荷低減のため、電子部品に使用するはんだの鉛フリー化が進められている。はんだ中の鉛 (Pb) には、スズ (Sn) や亜鉛 (Zn) がめっき等から針状の結晶 (ウスカ) として成長し、端子間で短絡故障が生じるのを防ぐ働きがあった。しかし、鉛フリー化の影響でその使用が規制されると、ウスカの成長を抑制する働きが弱められてしまう。対策として鉛の代替元素 (Bi, Cu, Ag 等) の使用によりウスカの抑制が図られている。ところが、銀 (Ag) や銅 (Cu) は封止樹脂中のイオン性不純物と反応しやすく、エレクトロケミカルマイグレーションの影響によって dendrite が成長しリード間の短絡故障を引き起こすなどの問題も報告されている。

半導体デバイスに関する技術の発展は、応用先の多様化や電子機器の高性能化・小型化などに貢献してきた。その一方で、半導体デバイスの信頼性において常に新たな問題を顕在化させてきた。

■信頼性作り込みにおける数と時間の壁

信頼性作り込みにおける数の壁とは、信頼性についての統計解析において、データ点数の少なさに伴う困難さのことを指す。時間の壁とは、長期間の信頼性を期待される製品において、製品寿命の長さに伴う困難

さのことを指す。

ワイブル解析では統計的に製品寿命を評価する。統計解析のためには、信頼性試験では同一の故障原因と故障メカニズムで一定数の製品を故障させる必要がある。しかしながら、半導体デバイスの信頼性はすでにかなり高い水準にあり、統計解析に資するだけのデータ点数を集めるには信頼性試験にかなりの時間を要する。現実的な試験期間では、故障品の数を十分に確保できない場合も多い。加えて、半導体デバイスでは、多種多様な故障原因と故障メカニズムが同一のストレス下で進行する。半導体デバイスの信頼性試験において複数の故障の要因が混在すると、解析に使えるデータ点数がさらに少なくなってしまう。

故障の要因を分離するには、理想的には、故障解析を事前に実施し故障原因や故障メカニズムを明らかにしてからワイブル解析を実施する必要がある。ところが、時間的な制約から、信頼性試験で出た故障品すべての故障解析は不可能なことも多い。現実的には、信頼性試験の実施後はワイブル解析を先に実施し、解析結果に折れ線等がみられた場合にだけ代表的な故障品に対してのみ故障解析が実施されている。

■開発コストと信頼性の両立 [35]

ここまでは、半導体デバイスの故障物理の複雑さに起因する信頼性作り込みの技術的な難しさについて考察してきた。これに加えて、一般の工業製品にも言えることだが、半導体デバイスの製品開発にはコスト的な厳しい制約もある。

半導体デバイスは、国際的な経済の下で熾烈な価格競争に曝され、より短期間での開発が迫られている。製品の価格面での競争力を維持するために、開発コスト低減の切実な努力が日々なされている。

製品開発のコストは、一般には、動員する技術者の数・開発期間・諸々の設備費などを指すことが多い。しかし、これらの要素に対する作業効率や生産性の改善だけでは、信頼性の作り込みは数と時間の壁に阻まれてしまう。信頼性作り込みの基本を試作品の製作とその破壊試験に置いているとすれば、予定された納期までに開発を完了できる可能性はかなり低くなる。仮に納期内に開発を終えられたとしても、信頼性を十分に作り込めておらず製品の市場投入後に重大な故障や事故が発生すると、結果的に大きな損失となる。半導体デバイスにおける開発コストと信頼性の両立は、現場の技術者に対し、常に厳しい現実として突き付けられている。

2.3.1.3 信頼性の作り込みにおいて故障解析が担う役割

■故障物理に基づいた信頼性の作り込み [25, 36, 37]

半導体デバイスの製品開発では、コスト的な厳しい制約がある。加えて、半導体デバイスの品質の低下は許されず、常に高い水準の信頼性が要求されている。開発コストと信頼性の両立は、矛盾した要求にも見える。しかし、いかに困難で矛盾を孕んだ要求であろうとも、現場の技術者たちが手をこまねいていることは許されない。

半導体デバイスの開発コストと信頼性を両立させるには、故障解析を活用した故障物理に基づく信頼性の作り込みがカギとなる。故障解析を活用し、製品の故障物理に関する知見を蓄積することで、生産性の高い信頼性作り込みが可能となる。

図 2.10 に故障解析を基点として考えた時の信頼性七つ道具の相互の関連を模式的に示している。図 2.10

は、参考文献 [25] p. 129, および、参考文献 [37] p. 2 を元に作成した。故障解析を通じて、どのような故障原因がどのような故障メカニズムで進行しどのような故障モードとして顕在化するのか、どのような対策が有効か、(1) 信頼性データベースに事前に知見を蓄積する。故障解析による故障物理のより良い理解が、(2) 信頼性設計技法、(3) FMEA/FTA、(4) デザインレビューからなる信頼性作り込みの演繹的なアプローチと (5) 信頼性試験、(6) 故障解析、(7) ワイブル解析からなる信頼性作り込みの帰納的なアプローチの生産性向上に大いに寄与する。

演繹的なアプローチにおいては、信頼性に関する設計作業の生産性向上に寄与する。製品開発の開始時点で故障の予測と対策に十分な知見が信頼性データベースに蓄積されていれば、信頼性に関する設計を容易に遂行できる。

帰納的なアプローチにおいては、主として信頼性試験の生産性向上に寄与する。故障メカニズムの加速性や加速試験の妥当性についての知見が事前に十分に蓄積されていれば、生産性の高い信頼性試験を実施することができる。

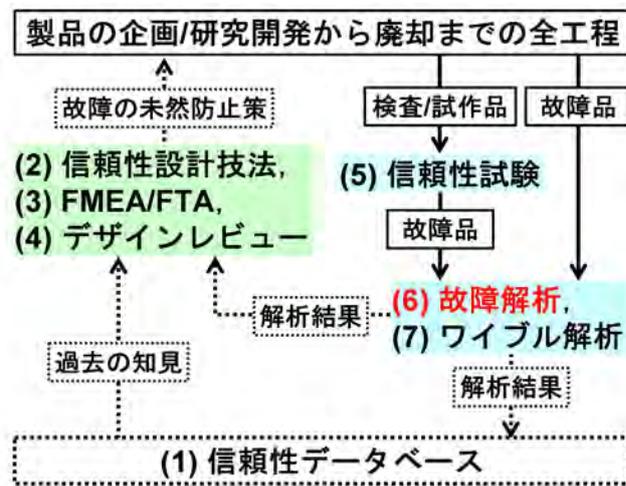


図 2.10: 信頼性作り込みの中での故障解析の位置づけ。

■数と時間の壁への挑戦 [38]

半導体デバイスの製品開発には、開発コストと信頼性の両立という厳しい現実がある。単なる作業効率の改善だけでは、開発コストと信頼性を両立させ短期間で開発を終わらせることは難しい。信頼性における数と時間の壁に阻まれ、開発納期の遅れや不十分な信頼性の作り込みが生じてしまう。

開発コストと信頼性を両立させるには、数と時間の壁への挑戦が必須となる。故障解析を十二分に活用し、故障物理に関する知見を積み上げていくことが重要となる。

そのためには、故障解析における更なる作業効率の改善が必要である。現在の故障解析には、多大な時間と労力が費やされている。故障解析に関する技術を発展させ数と時間の壁へ挑戦し続けることが、半導体デバイスの製品開発において競争力を維持するための重要な要素となる。

2.3.2 半導体デバイスの故障解析

2.3.2.1 半導体デバイスの故障解析の概要

■実施手順の大まかな流れ

半導体デバイスの製品開発において開発コストと信頼性を両立させるための、故障解析が果たす重要な役割について考察した。故障解析とは、先述のとおり、故障の原因の究明を目的として実施される一連の活動のことを指す。故障原因の究明には、対象とする製品の故障物理に基づいた解析が必要になる。

故障解析の基本的な流れは、全体から詳細へ、非破壊的な手段から破壊的な手段へ、である。故障解析は大まかには、(1) 故障状況の把握と電気的な特性の検査、(2) 故障箇所の絞込み、(3) 故障の原因の究明と対策の検討、という3つの工程で実施される。例として、市場投入後にユーザ側で故障が確認された半導体デバイスに対する故障解析の流れを示している。研究や開発の段階で実施される故障解析では、いくつかの手順が省略されることもあるが、大まかには以下のような手順を踏む。

(1) 故障状況の把握と電気的な特性の評価

- (1.1) 故障状況や使用履歴の確認
- (1.2) 製品の外観検査
- (1.3) 電子部品としての電気的な特性の評価
- (1.4) 再現実験 ※ (1.3) で故障が再現しない場合

(2) 故障箇所の絞込み

- (2.1) パッケージ部の故障箇所絞込み
- (2.2) パッケージの開封
- (2.3) チップ部の故障箇所絞込み

(3) 故障の原因の究明と対策の検討

- (2.1) 物理/化学的な解析
- (2.2) 根本原因の究明
- (2.3) 対策の検討

市場で発生した故障については、最大限の注意を払って故障解析を実施する。市場故障においては、ごく限られた数の故障品しか手に入らない場合が多い。このような場合に破壊的な手段を安直に適用してしまうと、故障原因を究明できなくなる恐れがあるためである。以下では(1)、(2)、(3)のそれぞれの工程のより詳細な役割を述べる。

■(1) 故障状況の把握と電気的な特性の評価

(1) 故障の再現の段階には、(1.1) 故障状況や使用履歴の確認、(1.2) 部品の外観検査、(1.3) 電子部品としての電気的な特性の評価、(1.4) 再現試験 ※ (1.3) で故障が再現しなかった場合、の4つの工程が含まれる。

故障によっては、高温下などの特殊な環境下でしか再現しないものも少なくない。故障の症状や状況を適切に再現しなければ、正確な故障原因を究明できない。

■(2) 故障箇所の絞込み

(2) 故障箇所の絞込みの段階では、(2.1) パッケージ部の故障箇所絞込み、(2.2) パッケージの開封、(2.3) チップ部の故障箇所絞込み、の3つが含まれる。

(1) においてどのような動作条件下で故障が再現するのか確認が取れると、(2) 故障箇所の絞込みが実施される。故障原因を究明するには、どこで故障が生じたのか特定する必要がある。半導体デバイスの外観はおおよそ数 cm 四方程度しかないものの、高集積化等の影響で内部構造は複雑になり、故障箇所の特定は一筋縄ではいかない。故障箇所を円滑に特定するために様々な技術が開発されている。

半導体デバイスの構成要素は、大まかにパッケージ部とチップ部に分けられる。チップ部の観察は一般的に、パッケージを開封しなければ実施できない。パッケージ部に故障箇所がないことを十分に確認した後にパッケージを開封し、チップ部の観察に移行するのが一般的な流れである。

■(3) 故障の原因の究明と対策の検討

(3) 故障の再現の段階には、(1.1) 物理/化学的な解析、(1.2) 根本原因の究明、(1.3) 対策の検討、という3つの工程が含まれる。

(2) に分類される技術では、故障箇所を絞込めても数百 nm 程度である。故障箇所の絞込みにおいては、その絞込まれた範囲のどこかになにかがあるという情報までしか得られない。この状態から、電子顕微鏡などによる物理的な解析と、種々の分光法などによる化学的な解析を併用し、故障箇所と故障原因を特定する作業に入る。物理/化学的な解析を終えてはじめて、故障箇所と故障原因を特定できたといえる。故障箇所と故障原因の特定後、特定された故障原因がどのような故障メカニズムで進行し、故障モードとして顕在化したのか説明するための理論的/実験的な検証に入る。

これらの結果として、特定された故障原因、最も支配的な故障メカニズム、顕在化した故障モードの間の因果関係をうまく説明できた時、故障への対策を検討するための判断材料が手に入る。故障への対策が定まったとき、故障解析が完了する。

2.3.2.2 故障箇所絞込みの重要性

■故障解析の成否を握る故障箇所の絞込み [39]

故障解析の成否は、半導体デバイスに発生した故障箇所の絞込みが適切に実施されたか否かに大きく依存する。半導体デバイスの内部構造が複雑なこと、故障モードから故障原因を推定することが困難なこと、これら2点がその主な理由である。

故障解析は、(2.2) パッケージの開封や(3.1) 物理/化学的な解析において、破壊的な手段を取る不可逆的な要素を含む。これら不可逆的な手段を不適切に適用すると、半導体デバイスから故障箇所が除去されてしまい、故障原因を究明できなくなる。このような理由から、(2.2) と(3.1) は細心の注意を払って実施され、(2) 故障箇所の絞込みには、自ずと多大なる時間と労力が費やされる。仮に故障解析を適切に遂行できたと

しても、結果的には故障解析に期待される役割を十分に果たせなくなる。

以上のような背景から、故障箇所絞込みを適切かつ迅速に行うための技術開発が実施され続けている。半導体デバイスの高性能化/高集積化に伴って内部構造はその複雑さを増している。効果的に故障箇所を絞込むための技術開発はよりいっそう重要となっている。

■段階的な絞込み

故障解析では、故障箇所を適切かつ迅速に絞込むことが重要とされる。しかし、半導体デバイスの故障解析では、たった一度の観察で故障箇所を絞込めることはほとんどない。故障箇所の絞込みの現実的な方法論として、故障の手がかりを利用し段階的に絞込むという方策が取られる。

故障の手がかりとは、故障箇所の近傍で生じる電気/電子回路的または物理的な異常な反応のことである。故障とは機能の喪失を意味する。半導体デバイスの内部には大小さまざまな電気/電子回路が形成されている。半導体デバイスの故障箇所近傍では、期待されるものや正常なものと異なる何らかの物理的な反応を示す。この反応を外部から観察する、もしくは励起することで故障箇所を観察できる。現在の多くの故障箇所絞込み技術は、この観点に則って開発されている。

故障箇所の段階的な絞込みとは、絞込みのための空間分解能を粗いものから細かいものへと徐々に移行させていくことを指す。一般に、空間分解能が高い手法ほど、一度に観察可能な視野が狭くなる傾向にある。故障箇所絞込みの初期段階では、広い視野に対して空間分解能の粗い手法を適用し、徐々に狭い視野でより空間分解能の高い手法に切り替えていく。結果的に、絞込みに要する時間と労力を小さくできる。

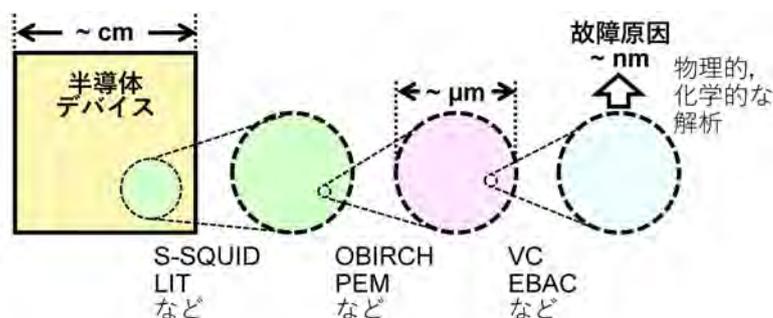


図 2.11: 段階的な故障箇所の絞込み。

2.4 半導体デバイスの故障箇所絞込み技術と本研究の提案手法

2.4.1 チップ部の故障箇所絞込み

2.4.1.1 チップ部の故障箇所絞込み技術の概要 [40]

チップ部の故障箇所絞込み技術は、非破壊的な手法と半破壊的な手法に大別される。非破壊的な手法で数 μm オーダーまで故障箇所絞込んだのち、上層の配線などを除去した後に半破壊的な手法で数十 nm オーダーまで絞込み、Scanning Electron Microscope (SEM) や Transmission Electron Microscope (TEM) 等を用いた物理/化学的な解析へとつなげる。

非破壊的な手法としては、Optical Beam Induced Resistance Change (OBIRCH) や Photo Emission

Microscope (PEM) が日常的に用いられている。動的な解析には Electro Optical Probing (EOP) や Laser Voltage Probing (LVP) が用いられている。最も歴史が古いものとしては Electron Beam Tester (EBT) がある。

半破壊的な手法としては、ナノプロービングや、電子ビームを用いる Voltage Contrast (VC) や Electron Beam Absorbed Current (EBAC) などがある。

2.4.1.2 チップ部の故障箇所絞込みに必要な前処理とその懸念

■パッケージ材として主流の封止樹脂

半導体デバイスのチップは、外部環境からの保護を目的として、一般的にパッケージで封止されている。パッケージの材料としては、セラミックス、金属、樹脂成形材などがある。セラミックスや金属を利用したパッケージは、一部の高機能かつ高価格な製品で利用されている。

半導体デバイスの低価格化や多ピン化が進むなか、樹脂成形材が封止樹脂として、パッケージの主要な材料に選ばれるようになった。以後では、パッケージが封止樹脂の場合に限り議論を進める。

■封止樹脂の開封

半導体デバイスの封止樹脂が果たす役割の一つとして、外来光からチップを保護する働きがある。外来光が可視光と同程度の波長の場合は、光電流が励起されノイズや誤動作の原因となる。波長が紫外光より短い場合は、チップに形成されている微細な半導体の結晶を傷つける恐れがある。外来光が起こすこれらの問題からデバイスを保護するために、封止樹脂は添加剤によって光の透過性を著しく低下させている。

しかし、OBIRCH をはじめとしたチップ部の故障箇所絞込み手法は光を利用するため、封止樹脂を何かしらの方法で除去し、開封する必要がある。封止樹脂の開封は一般的に、次の流れで実施される [29]。

(1) レーザ加工 : レーザを照射し熱的に分解させ、樹脂を薄膜化させる、

(2) 薬液による溶解 : 発煙硝酸などを加熱条件下で滴下し、樹脂を除去する、

(1) レーザ加工でチップの表面を露出させる場合、局所的かつ極度の発熱によってチップを傷つける恐れがある。多くの場合、チップを露出させる最後の作業は、(2) 薬液による溶解にて実施される。

■封止樹脂の開封に伴う懸念

しかしながら、封止樹脂の開封には、半導体デバイスの故障の再現性の悪化が懸念されるためである [41]。封止樹脂のみならず、故障箇所に存在する物質も、開封のための薬液に対して化学反応を起こす恐れがある。故障箇所薬液との反応が起きると、封止樹脂と共に故障箇所も除去されてしまう。加えて、チップ部やパッケージ部の健全な箇所も薬液に対して化学反応を起こす恐れがある。健全な箇所で薬液との反応が起きると、真なる故障原因とはなんら関係のない故障が生じてしまう。

不適切な封止樹脂の開封が施された場合、故障原因の喪失だけでなく、故障原因を誤って理解し、無意味な結論を導き出す場合もある。実際の故障解析では、細心の注意を払って封止樹脂の開封作業が実施される。

2.4.1.3 封止樹脂の開封技術の概要

■薬液を用いた封止樹脂の開封技術に関する研究開発の動向

以上のような背景から、薬液を用いた開封技術については、様々な視点で技術開発が進められている。

パッケージ部に属すボンディングワイヤは銅を原料としており、樹脂開封用の発煙硝酸などの薬液と反応しやすい。ボンディングワイヤとの反応を抑え樹脂のみを選択的に溶解させる方法が提案されている [42, 43]。また、チップ部の配線や絶縁膜も発煙硝酸などと反応しやすい、チップ部に影響を与えない工夫としてアルカリ系の溶液を使用した方法論も提案されている [44, 45]。

別な視点として、レーザをうまく利用し薬液による悪影響を最小限に抑える工夫についても報告がある [46–48]。この種の方法では、限られた狭い範囲の封止樹脂をレーザ加工で可能な限り薄膜化したのち、薬液の影響範囲を最小限に抑えて溶解させる。

■薬液を用いない封止樹脂の開封技術に関する研究開発の動向

薬液を使用しない封止樹脂の開封方法についての報告もある。主流なものは、レーザ加工単体で樹脂を開封する方法や、レーザ加工とプラズマエッチングを組み合わせた方法である。

レーザ加工は、極度の発熱でチップを破壊する恐れがある。作業中のレーザによる封止樹脂の発熱量をモニタリングしつつ開封を進める方法が提案されている [49, 50]。プラズマエッチングは、レーザや薬液で封止樹脂を薄膜化させた後で適用し、封止樹脂を開封する [51, 52]。

これら二つの方法にも課題は残っている [53, 54]。例えば、レーザ加工のみでの開封では、熱分解した封止樹脂をチップ上から除去しきれずに分解された状態で取り残されてしまう恐れがある。プラズマエッチングでは、樹脂はエッチングできるが、樹脂中の充填剤のシリカ粒子はエッチングされずボンディングワイヤ等を傷つける恐れがある。

レーザ加工単体やプラズマエッチングを利用する技術は、以上の懸念を許容できる場合か、半導体デバイスの裏面の加工で適用されることが多いようである。

■封止樹脂の開封の懸念事項に対する現実的な方策

現在開発されている技術では、封止樹脂の開封作業において故障の再現性の悪化を微塵も招かないという保証はできない。現実的には、事前に故障の箇所と原因についてある程度の予測を立ててから封止樹脂の開封作業に入る。

故障箇所が分れば、封止樹脂の局所的な開封が可能となり、健全部への影響を最小限に抑えることが出来る。故障原因については、故障品の使用履歴や故障箇所とチップ上の回路パターンなどから総合的に判断し、その候補を推測可能となる。故障原因の候補が定まれば、故障原因に対してより影響が少ない開封方法を選択することができる。

封止樹脂の開封に際し故障の再現性を維持する上で、磁場や発熱を利用した事前の故障箇所絞込みの適用が有効だとの報告もある [41]。封止樹脂の開封前にチップ部の故障箇所の大まかな絞込みが可能な既存技術としては、磁場を利用する S-SQUID と発熱を利用する LIT が一般的な手法として利用されている。

2.4.2 封止樹脂の開封前に適用可能な既存の故障箇所絞込み技術

2.4.2.1 封止樹脂の開封前にチップ部の故障箇所を絞込むための既存技術

■Scanning-Superconducting QUantum Interference Device (S-SQUID)

Scanning-SQUID (S-SQUID) は、半導体デバイスの内部に磁場を生じさせ、その磁場を超電導状態で高感度に観察する手法である。Superconducting QUantum Interference Device (SQUID) とは、超電導状態で発現するジョセフソン効果を利用した高感度な磁気センサーのことである。SQUID は、1964 年に R.C. Jaklevic らによって発明された [55]。

図 2.12 に、S-SQUID を利用した故障箇所絞込みの仕組みを模式的に示している。半導体デバイスの端子間に電流を流しつつ SQUID 磁束計を 2 次元走査させることで、内部に生じている電流経路の像が得られる。S-SQUID では、この電流経路像を利用して故障箇所を絞込む。S-SQUID によって半導体デバイス内部の短絡故障を観察可能なこと [56–58]、開放故障を観察可能なこと [59] が報告されている。

磁場は、封止樹脂の有無にかかわらず半導体デバイスの外部に微弱ながら漏れ出している。この微弱な磁場を SQUID を用いて高感度に観察することにより、封止樹脂を介してチップ部の故障箇所を絞込むことができる。

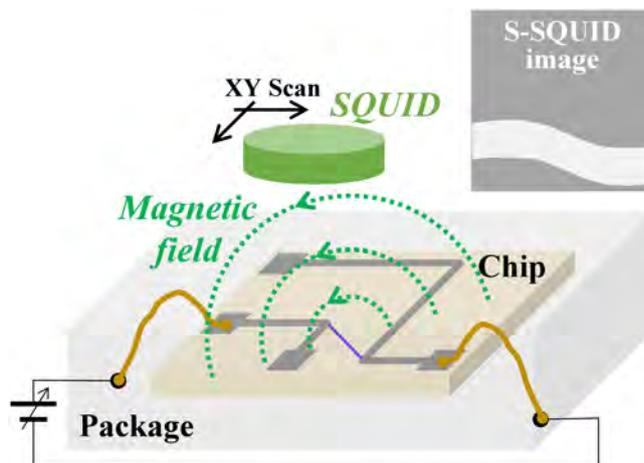


図 2.12: S-SQUID による電流経路の観察の模式図。

■Lock In Thermography (LIT)

Lock In Thermography (LIT) は、半導体デバイスの内部にジュール発熱を生じさせ、サーモカメラで観察する手法である。故障箇所は正常部に比して異常な発熱を示す場合が多い。LIT では、半導体デバイスの内部に生じる異常な発熱を利用して故障箇所を絞込む。

LIT では、半導体デバイスに電流を流し、この電流に対して数 Hz 程度の変調をかける。電流が流れることで電流経路でジュール発熱が生じる。この発熱をサーモカメラで検出し、画像に位相検波と同様な処理を施すことで空間分解能が大幅に改善される。故障箇所が生じたジュール発熱が封止樹脂の表面に形成する温度変化を撮像し、位相検波の原理を応用した画像処理を施すことで、封止樹脂を開封せずにチップ部の故障箇所の絞込みが可能となる [60]。

図 2.13 に、LIT を利用した故障箇所絞込みの仕組みを模式的に示している。1988 年、P.K. Kuo らによって赤外線カメラを用いた故障箇所絞込み手法が提案された [61]。当初は、電子回路の基板上にある銅薄膜内部のクラックを検出するための技術として提案された。その後 1996 年に、D. Wu らによって半導体デバイスの故障解析に応用された [62]。さらに、赤外線カメラの性能向上とともに、O. Breitenstein らが位相検波の方法論の適用によって空間分解能を大きく改善し、LIT として普及するようになった [63]。熱伝導に要する時間の差が LIT の位相差として現れるため、信号の位相差を利用して半導体デバイスの厚さ方向に対し故障箇所を分離する方法論についても報告されている [64–67]。

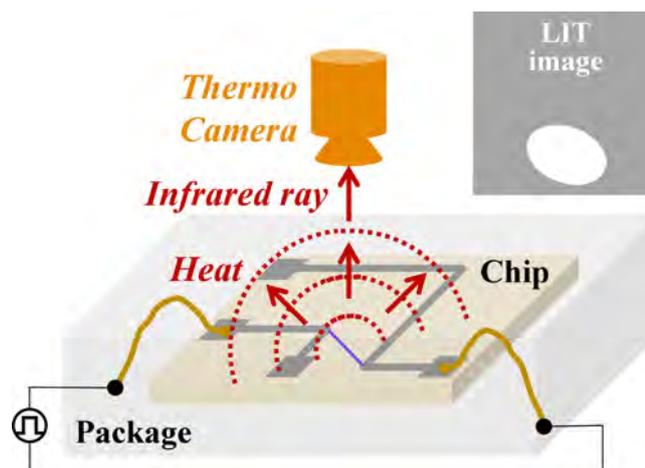


図 2.13: LIT による電流経路の観察の模式図.

2.4.3 本研究で提案する超音波加熱を利用した故障箇所絞込み手法

2.4.3.1 超音波顕微鏡を利用した新たな故障箇所絞込み手法

■ultraSONic Beam Induced Resistance CHange (SOBIRCH) の提案

本研究では、超音波顕微鏡を利用した新たな故障箇所絞込み技術として、ultraSONic Beam Induced Resistance CHange (SOBIRCH) を提案する。

図 2.14 には、本研究で提案する SOBIRCH を利用した故障箇所絞込みの様子を模式的に示している。SOBIRCH では、集束超音波を用いて半導体デバイスのチップ部にある電流経路の周辺を加熱し、OBIRCH と同様に電流変動を誘起させ、故障箇所を絞込む。

超音波は、半導体デバイスの封止樹脂中の空隙やチップと樹脂との剥離およびボンディングワイヤの故障等の絞込みに利用されている [68–72]。超音波を集束させ焦点近傍のエネルギー密度を高めることにより、封止樹脂を介して電流変動を誘起でき、チップ上の電流経路を観察可能と期待できる。

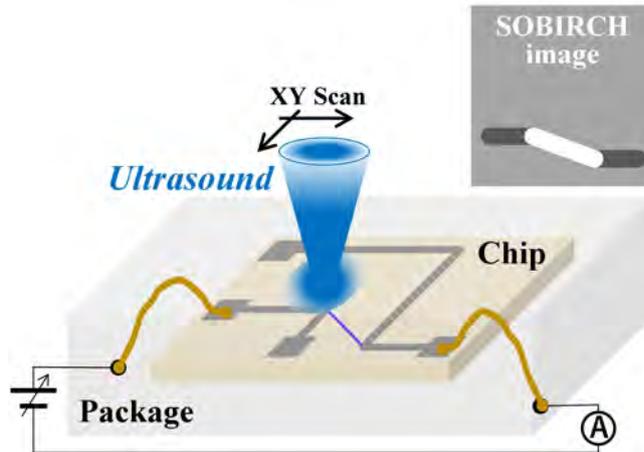


図 2.14: SOBIRCH による電流経路の観察の模式図.

■SOBIRCH に予想される長所

磁場や発熱を利用する S-SQUID や LIT は、半導体デバイスのチップ上の電流経路で生じる磁場や発熱を半導体デバイスの外部で検出し電流経路を撮像するため、封止樹脂が厚いほど空間分解能が低下する。

一方で、SOBIRCH は、高い集束性を有する高周波な集束超音波を用いて電流経路を加熱するため、封止樹脂の厚さに対し空間分解能が影響を受けにくいと予想される。結果的に、封止樹脂の厚さに大きく左右されず、SOBIRCH は S-SQUID や LIT よりも高い空間分解能で故障箇所を絞込み可能なことが期待される。

2.4.3.2 学位論文としての研究の目的と位置づけ

図 2.15 には、SOBIRCH の研究の目標を概念的に示している。SOBIRCH は、磁場や発熱を利用する既存手法よりも高い空間分解能で、封止樹脂の開封前に電流経路に関連した故障の有無の把握を可能とすることを目標に提案された。より高い空間分解能での故障箇所の絞込みが可能となればより限定された範囲で封止樹脂を開封でき、SOBIRCH は、開封作業の効率化とチップ部の故障箇所絞込みのより円滑な実施に寄与できると期待される。

本学位論文では、実用化の前段階として、提案手法の SOBIRCH の信号と超音波加熱の関係に対する波動の伝搬に基づいた検証を目的として研究を実施した。以下に、本学位論文の第 4 章から第 6 章に対応した 3 つの主要な論点を示す。第 4 章以降では、下記 3 つの論点に対して議論を行う。

論点 1 (第 4 章): 提案手法の SOBIRCH により電流経路を観察可能か?

論点 2 (第 5 章): 封止樹脂を介しても SOBIRCH により電流経路を観察可能か?

論点 3 (第 6 章): チップが積層された半導体デバイスに対しても適用可能か?



図 2.15: SOBIRCH の研究の目標.

第3章

提案手法の原理と測定系

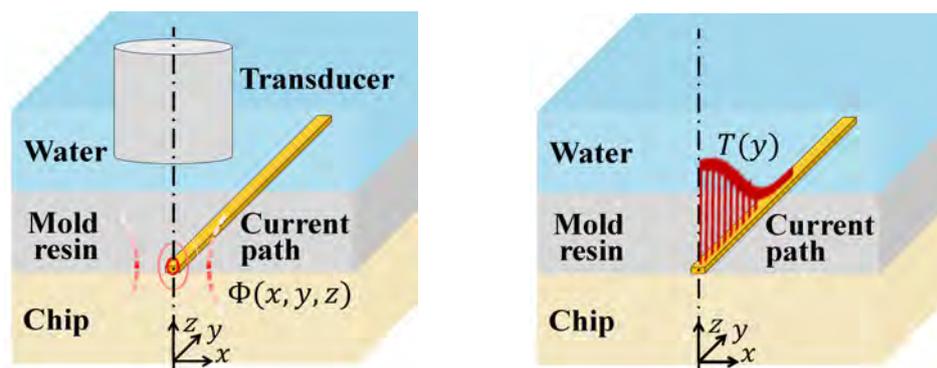
3.1 提案手法の原理

3.1.1 音響場と温度場の分布および抵抗変動

3.1.1.1 集束超音波が生じさせる温度分布

本研究で提案する SOBIRCH では、集束超音波により観察対象となる電流経路の周辺を加熱する。この超音波加熱が電流経路内に誘起する電流変動を SOBIRCH の信号として利用する。SOBIRCH は、光加熱を利用する OBIRCH の原理を参考にして開発された手法である (OBIRCH については章末の補足参照)。

図 3.1 は、SOBIRCH の測定の原理を模式的に示している。図 3.1 において、SOBIRCH の観察対象となる電流経路を、形式的に、幅は無視できるほどに十分細いある種の金属配線で表記する。図 3.1(a) に示すように、球面の超音波振動子が観察対象の半導体デバイス内部に集束超音波の音響場 $\Phi(x, y, z)$ を形成する。この音響場 $\Phi(x, y, z)$ を熱源として電流経路上に温度分布 $T(y)$ が生じる。この温度分布が電流経路に抵抗変動を生じさせる。この抵抗変動を電流変動として検出し、SOBIRCH の信号として利用する。



(a) 音響場 $\Phi(x, y, z)$.

(b) 温度分布 $T(y)$.

図 3.1: 超音波加熱によって電流経路の近傍に生じる温度分布.

3.1.1.2 温度分布に起因する抵抗変動の検出

図 3.2 に、電流検出についての模式図を示す。観察対象には定電圧を印加し、電流経路に流れる電流をトランスインピーダンスアンプで電圧信号に変化し、検出する。

SOBIRCH では、図 3.2 のように、観察対象の電流経路にバイアス電圧を印加した状態で電流アンプを用いて流れている電流を監視しつつ、超音波による加熱を実施する。観察対象の電流経路が超音波で加熱されると、図 3.1 のような仕組みで電流経路の抵抗が変動し、電流変動が生じる。この超音波加熱で誘起される電流変動を信号として検出する。

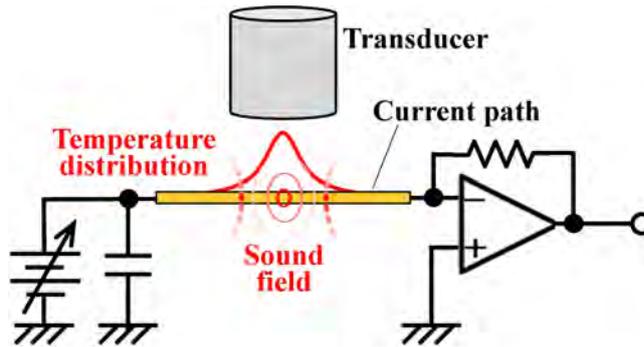


図 3.2: トランスインピーダンスアンプを用いた微小電流の検出。

3.1.2 抵抗変動と電流変動の関係

温度分布 $T(y)$ に基づき、抵抗温度係数 α に依存して電流経路内の電気抵抗が変動する。図 3.1 において、電流経路が $x-y$ 平面上に存在し、 y 軸の原点から正の方向に伸びているとする。温度分布が集束超音波が生じさせた温度分布の広がりよりも電流経路の線幅が十分に小さいと仮定すれば、電流経路上の温度分布を y 軸上の一次元問題に帰着できる。このとき、電流経路に生じる抵抗変動を ΔR とすれば、

$$\Delta R = \alpha \frac{\rho}{S} \int T(y) dy \quad (3.1)$$

と表現できる。式 (3.1) では、 ρ , S は電流経路の抵抗率及び断面積を示している。

式 (3.1) のようにして超音波加熱によって電流経路に生じる抵抗変動を定義した。この抵抗変動より、SOBIRCH の信号として検出される電流変動量を導出する。電流経路の抵抗値、印加されているバイアス電圧と流れているバイアス電流および抵抗が変動した後の電流をそれぞれ、 R , V_b , I_b , I' とすると、

$$I_b = \frac{V_b}{R}, \quad I' = \frac{V_b}{R + \Delta R}. \quad (3.2)$$

I' と I_b の差を取れば、SOBIRCH 信号 ΔI は、

$$\Delta I = I' - I_b = \left(\frac{1}{R + \Delta R} - \frac{1}{R} \right) V_b. \quad (3.3)$$

以上をまとめると、

$$\Delta I = -\frac{\Delta R}{R(R + \Delta R)} V_b = -\frac{\Delta R}{R + \Delta R} I_b. \quad (3.4)$$

ここで、超音波加熱による温度上昇はごく小さいことが予想されるため、 $R \gg \Delta R$ という近似を導入すれば、式 (3.4) は式 (3.5) のように表現される。

$$\therefore \Delta I \approx -\frac{\Delta R}{R} I_b. \quad (3.5)$$

3.1.3 典型的な電流経路からの信号

3.1.3.1 正常配線からの信号

故障箇所からの信号を考える前に、正常配線を加熱した際に得られる信号について考察する。式 (3.5) より、正常配線から得られる信号 ΔI_0 は、

$$\Delta I_0 = -\frac{\Delta R}{R} I_b$$

とかける。ここで、配線の厚さ・幅・長さ・抵抗率・抵抗温度係数・長さ方向 y に沿った配線中の温度分布を、 D , x_0 , y_0 , ρ , α , T とすると配線抵抗 R と抵抗変化量 ΔR は、

$$R = \rho \frac{y_0}{Dx_0}, \quad \Delta R = \rho \frac{1}{Dx_0} \alpha \int T(y) dy$$

であるため、 ΔI_0 は、

$$\begin{aligned} \Delta I_0 &= -I_b \frac{\rho \frac{1}{Dx_0} \alpha \int T(y) dy}{\rho \frac{y_0}{Dx_0}}, \\ \therefore \Delta I_0 &= -\frac{I_b}{y_0} \alpha \int T(y) dy \end{aligned} \quad (3.6)$$

となる。式 (3.6) より、 ΔI_0 は、バイアス電流 I_b に比例し、また配線長 y_0 言い換えれば配線抵抗 R に反比例するといえる。

3.1.3.2 正常配線に接続されている接地線を加熱したときの信号

次に、接地線が加熱されたときに得られる信号 ΔI_G について考察する。接地線の厚さは式 (3.6) の導出で用いた正常配線と等しいと仮定し、接地線幅を x_G とすると、抵抗変化量 ΔR_G は、

$$\Delta R_G = \rho \frac{1}{Dx_G} \alpha \int T(y) dy$$

となるため、接地線からの信号 ΔI_G は、

$$\Delta I_G = -\frac{\Delta R_G}{R} I_b = -I_b \frac{\rho \frac{1}{Dx_G} \alpha \int T(y) dy}{\rho \frac{y_0}{Dx_0}} = -\frac{x_0}{x_G} \frac{I_b}{y_0} \alpha \int T(y) dy$$

となるので、式 (3.6) を用いると、式 (3.7) のように表せる。

$$\therefore \Delta I_G = \frac{x_0}{x_G} \Delta I_0. \quad (3.7)$$

ここで、接地線の抵抗値は正常配線の抵抗値より小さいので、 $x_G > x_0$ の関係を仮定すると、

$$\Delta|I_G| < \Delta|I_0| \quad (3.8)$$

となり、 x_G が x_0 に対して大きいほど、信号強度が小さくなる。

3.1.3.3 クラックがある配線からの信号

図 3.3 に示すような線幅 x_0 の配線中にあるクラック周辺の長さ y_C 線幅 x_C の配線を加熱したときの信号について考察する。クラックを含めた場合の配線全体の抵抗値を R' とすると、配線中の正常部の配線を加熱したときの信号 ΔI_0 とクラックによって配線幅が細くなった部分を加熱したときの信号 ΔI_C はそれぞれ、

$$\Delta I_0 = -\frac{\Delta R_0}{R'} I_b, \quad (3.9)$$

$$\Delta I_C = -\frac{\Delta R_C}{R'} I_b \quad (3.10)$$

となる。ここで、 ΔR_0 と ΔR_C はそれぞれ配線の正常部とクラック周辺を加熱したときの抵抗変化量である。これらの抵抗変化量 ΔR_0 と ΔR_C を図 (3.3) 中に示す文字と配線の抵抗率 ρ 、厚さ D 、抵抗温度係数 α を用いて書き下すと、式 (3.11) と式 (3.12) のようになる。

$$\Delta R_0 = 2\frac{\rho\alpha}{Dx_0} \int_0^\infty T(y)dy. \quad (3.11)$$

$$\Delta R_C = \frac{2\rho\alpha}{Dx_C} \int_0^{y_C/2} T(y)dy + \frac{2\rho\alpha}{Dx_0} \int_{y_C/2}^\infty T(y)dy. \quad (3.12)$$

式 (3.11) と式 (3.12) を定義する際に、「配線中の温度分布は x 軸に依存せず y 軸方向のみに分布を持ち、かつ配線の長さは温度分布の広がりと比較すると無限大に近似できる」という仮定を用いた。 ΔI_C と ΔI_0 の比に式 (3.11) と式 (3.12) を代入すると、式 (3.13) のように示される。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I_C}{\Delta I_0} &= \frac{\Delta R_C}{\Delta R_0} = \frac{\frac{1}{x_C} \int_0^{y_C/2} T(y)dy + \frac{1}{x_0} \int_{y_C/2}^\infty T(y)dy}{\frac{1}{x_0} \int_0^\infty T(y)dy} \\ &= \frac{\frac{x_0}{x_C} \int_0^{y_C/2} T(y)dy + \int_{y_C/2}^\infty T(y)dy}{\int_0^\infty T(y)dy}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

温度分布 T は $y = \infty$ で 0 に収束する単調減少な関数と仮定すれば、

$$\int_{y_C/2}^\infty T(y)dy = \int_0^\infty T(y)dy - \int_0^{y_C/2} T(y)dy$$

と展開することができ、

$$\begin{aligned}\frac{\Delta I_C}{\Delta I_0} &= \frac{\frac{x_0}{x_C} \int_0^{y_C/2} T(y) dy + \int_{y_C/2}^{\infty} T(y) dy}{\int_0^{\infty} T(y) dy} \\ &= \frac{\frac{x_0}{x_C} \int_0^{y_C/2} T(y) dy + \int_0^{\infty} T(y) dy - \int_0^{y_C/2} T(y) dy}{\int_0^{\infty} T(y) dy}\end{aligned}$$

より、式 (3.13) は式 (3.14) のようになる。

$$\therefore \frac{\Delta I_C}{\Delta I_0} = \left(\frac{x_0}{x_C} - 1 \right) \frac{\int_0^{y_C/2} T(y) dy}{\int_0^{\infty} T(y) dy} + 1 > 0 \quad (\because x_0 > x_C). \quad (3.14)$$

また、温度分布が半値全幅 w のガウス分布に近似できるとすれば、 T は

$$T(y) = \exp\left(-\frac{y^2}{\left(\frac{w}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2}\right) \quad (3.15)$$

と式 (3.15) のようになり、式 (3.14) より信号強度比 $\Delta I_C/\Delta I_0$ は、

$$\begin{aligned}\frac{\Delta I_C}{\Delta I_0} &= \left(\frac{x_0}{x_C} - 1 \right) \frac{\int_0^{y_C/2} \exp\left(-\frac{y^2}{\left(\frac{w}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2}\right) dy}{\frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{w}{2\sqrt{\ln 2}}} + 1, \\ \frac{\Delta I_C}{\Delta I_0} &= \left(\frac{x_0}{x_C} - 1 \right) \frac{\frac{w}{2\sqrt{\ln 2}} \int_0^{\sqrt{\ln 2} \cdot y_C/w} \exp(-\xi^2) d\xi}{\frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{w}{2\sqrt{\ln 2}}} + 1 \quad \left(\because \xi = \frac{y}{\frac{w}{2\sqrt{\ln 2}}}, \quad d\xi = \frac{1}{\frac{w}{2\sqrt{\ln 2}}} dy \right), \\ \therefore \frac{\Delta I_C}{\Delta I_0} &= \left(\frac{x_0}{x_C} - 1 \right) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{\ln 2} \cdot y_C/w} \exp(-\xi^2) d\xi + 1\end{aligned} \quad (3.16)$$

と、式 (3.16) のようになる。結果として、温度分布を半値全幅 w のガウス分布に近似すると信号強度比 $\Delta I_C/\Delta I_0$ はガウスの誤差関数を用いて表現される。このとき、 $y_C \rightarrow 0$ と $y_C \rightarrow \infty$ のときの式 (3.16) の極限は次のようになる。

$$\lim_{y_C \rightarrow 0} \frac{\Delta I_C}{\Delta I_0} = \left(\frac{x_0}{x_C} - 1 \right) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^0 \exp(-\xi^2) d\xi + 1 = 1. \quad (3.17)$$

$$\lim_{y_C \rightarrow \infty} \frac{\Delta I_C}{\Delta I_0} = \left(\frac{x_0}{x_C} - 1 \right) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi + 1 = \frac{x_0}{x_C} - 1 + 1 = \frac{x_0}{x_C}. \quad (3.18)$$

図 3.4 は横軸に y_C/w をとったときの $\Delta I_C/\Delta I_0$ の変化の様子を示している。図 3.4 からわかるように、 y_C が w よりも小さい場合は、 y_C が大きくなるに従い、ほぼ直線的に信号強度が増加しているが、 y_C が w よりも大きくなると次第に値が飽和し最終的には x_0/x_C に収束する。

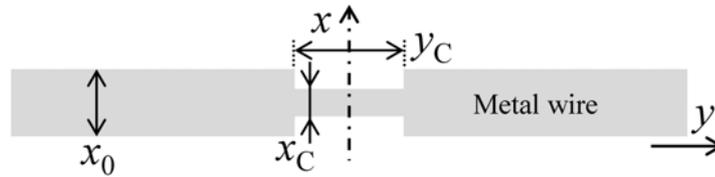


図 3.3: 亀裂のある配線のモデル.

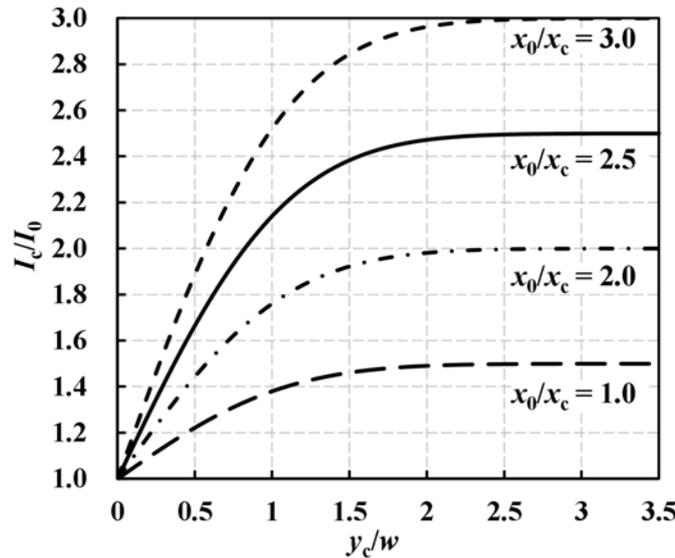


図 3.4: 亀裂のある配線からの SOBIRCH 信号の強度と亀裂の大きさの関係の計算例.

3.2 提案手法の測定系

3.2.1 電流経路の撮像

■位相検波による高感度な信号の検出

図 3.5 に, SOBIRCH の測定系の外観を示す. 図 3.6 に, SOBIRCH の測定系の模式図を示す. 本研究で提案する SOBIRCH において超音波加熱で誘起される電流変動の大きさは, OBIRCH のレーザー加熱で誘起されるものよりも極めて小さいことが予想される. 超音波振動子から出射可能なエネルギーがレーザーに比べ小さいこと, 超音波の焦点領域の広がり起因する焦点近傍でのエネルギー密度が低下すること, などが理由である. したがって, SOBIRCH では, 信号の検出感度を向上させるためロックインアンプにより位相検波を行う. 本研究では, 二位相ロックインアンプ (5610B, NF 回路ブロック) を使用した.

超音波振動子に対し印加される数十 MHz 程度の連続波に対し, Duty 比 50 % の数 kHz 程度の方形波を使って振幅変調を掛ける. 振幅変調された連続波を超音波振動子に印加することで最終的に得られる電流変動も同程度の変調がかかることになる. この電流変動信号をロックインアンプにより高感度に検出する.



図 3.5: SOBIRCH の測定系.

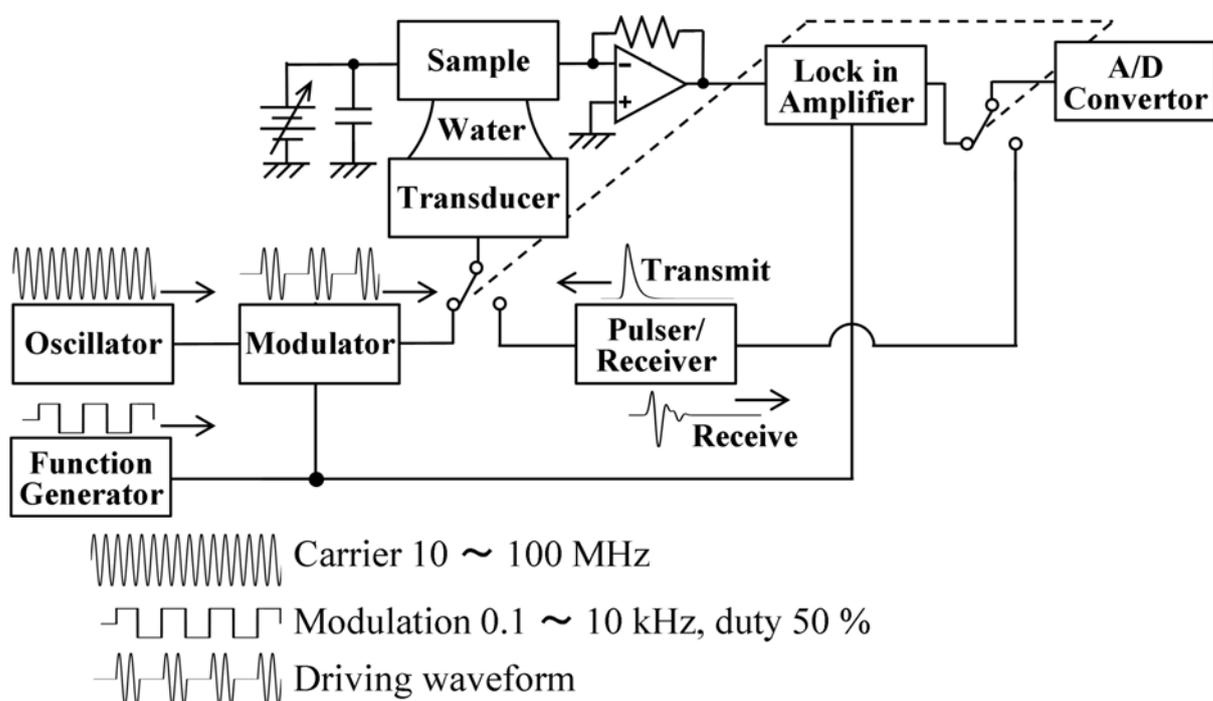


図 3.6: SOBIRCH の測定系の模式図.

■振動子と観察対象の音響的な結合

SOBIRCH では、倒立型顕微鏡の様式を採用している。倒立型を採用することで半導体デバイスに触れる水の量を最小限に抑えている。

図 3.6 に示すように、観察対象の半導体デバイスと超音波振動子の間には水が存在する。超音波振動子もつ音響インピーダンスが非常に大きく、空気の音響インピーダンスが極めて小さいため、観察対象へ超音波を導くために音響結合剤として水が頻繁に使われている。

■超音波振動子の機械走査

超音波振動子は、機械ステージにより二次元的な走査を行いながら観察対象を超音波で加熱する。機械ステージの走査位置と検出した SOBIRCH 信号を同期させることで、電流経路に対応した像が得られる。観

観察視野内に電流経路が存在すれば、前節で示した原理に則って電流経路の像 (SOBIRCH 像) が得られ、像の中に電流変動の大きさに対応したコントラストが現れる。

SOBIRCH 像の標準的な走査速度は、画像の 1 pixel あたりでの振動子の滞在時間を変調周波数の 10 周期としている。この標準的な走査速度で 1 mm^2 の視野を撮像する場合、画像の画素数を一万点とすると、取得時間はおよそ 5 分となる。

3.2.2 提案手法を用いた故障箇所の絞込み

3.2.2.1 超音波顕微鏡との組み合わせによる電流経路の位置の判別

図 3.7 は、SOBIRCH を用いた故障箇所絞込みについて模式的に示している。故障箇所の絞込みにおいては、SOBIRCH に先立ち、パルス駆動型の超音波顕微鏡を用いて超音波反射像を取得し、観察視野の特定を行う (パルス駆動型超音波顕微鏡については章末の補足参照)。反射像から観察視野を特定した後、SOBIRCH を用いて電流経路像を取得する。超音波反射像と電流経路像を重ね合わせることで、観察された電流経路がチップ上のどの位置にあるかについての判断が可能となる。

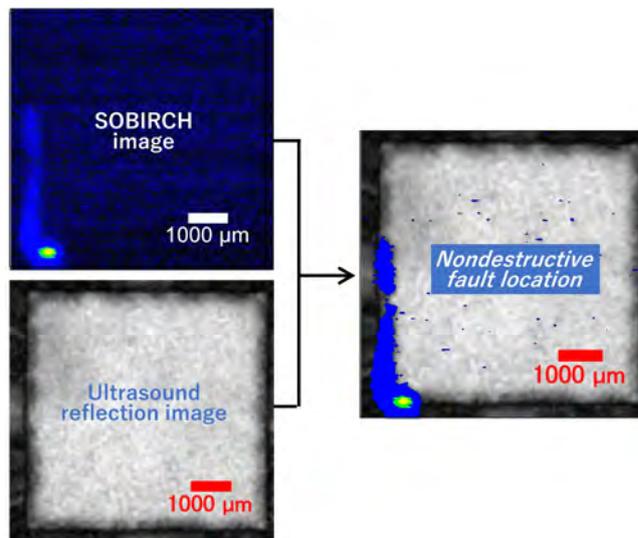


図 3.7: 超音波反射像と SOBIRCH 像の重ね合わせによる故障箇所の絞込み。

3.2.2.2 故障解析の流れの中での提案手法の位置づけ

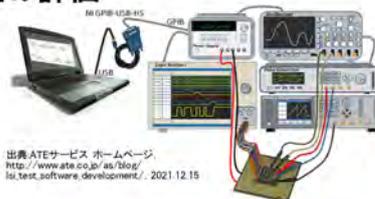
図 3.8 は、半導体デバイスの故障解析の流れにおける提案手法の SOBIRCH の位置づけについて模式的に示している。本研究の提案手法の SOBIRCH は、LSI テスタ等で故障が生じた端子の組み合わせを調べた後に適用される手法である。故障が生じたと判断された端子間に電圧を印加し SOBIRCH を適用することで、故障によってどのような異常な電流経路が半導体デバイスに生じているのか確認でき、故障箇所を絞込むことができる。

SOBIRCH による故障箇所の把握の後、故障箇所の近傍の封止樹脂を開封し、光などを利用した空間分解能のより高い手法を用いてさらに詳細に故障箇所を絞込む。光などを利用した詳細な絞込みの次には、Focused Ion Beam (FIB) 等を利用して断面だしなどの破壊的な作業を実施し、電子顕微鏡や組成分析を適

用して故障箇所の厳密な特定と、故障原因の究明を行う。

1. 故障状況の把握と電気的な特性の評価

使用履歴の確認
信頼性試験
LSIテストなど



出典 ATEサービス ホームページ
http://www.ate.co.jp/as/blog/lsi_test_software_development/, 2021.12.19

2. 故障箇所の絞込み

➤ 封止樹脂の開封前

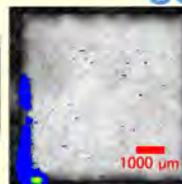
発熱解析
磁場解析
SOBIRCH



出典 測定アナリシス ホームページ
https://www.nanoanalysis.co.jp/business/case_example_143.html, 2021.12.17

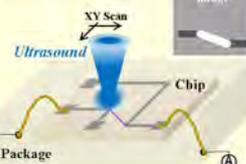


出典 沖エンジニアリング ホームページ
<https://www.oeg.co.jp/analysis/L-3rdhermo.html>, 2021.12.17



出典 松本直, et al. IPFA 2017

SOBIRCH



➤ 封止樹脂の開封後

レーザー顕微鏡
電子ビームテストなど



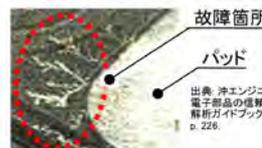
出典 沖エンジニアリング ホームページ
<https://www.oeg.co.jp/analysis/decap.html>, 2021.12.17



出典 N. Herfurth, et al. Microelectronics Reliability, 2019

3. 故障原因の究明と対策の検討

電子顕微鏡
組成分析など



出典 沖エンジニアリング編 電子部品の信頼性評価・解析ガイドブックPart2 p. 229.

図 3.8: 故障解析の流れの中での SOBIRCH の位置づけ。

3.3 提案手法の測定系に関する文献調査

3.3.1 光加熱を利用した故障箇所絞込み手法に関する文献調査

■Optical Beam Induced Resistance CHange (OBIRCH) の原理

チップ部の故障箇所絞込み手法として Optical Beam Induced Resistance CHange (OBIRCH) [73–75] が頻繁に利用されている。OBIRCH は、レーザー加熱が誘起する電流変動を利用して故障箇所を絞込む手法である [76–78]。

図 3.9 は、OBIRCH の測定原理を模式的に示している。チップにバイアス電流が流れている状態で、レーザーによる 2 次元走査を実施する。レーザーにより被照射部が加熱され、温度上昇に伴って電流経路の内部で電気抵抗の変動が生じる。この電気抵抗の変動を、バイアス電流の変動量を振幅にもった信号として検出する。電流の変動量とレーザーの走査位置を同期させ、電流経路に起因する OBIRCH 像を得る。

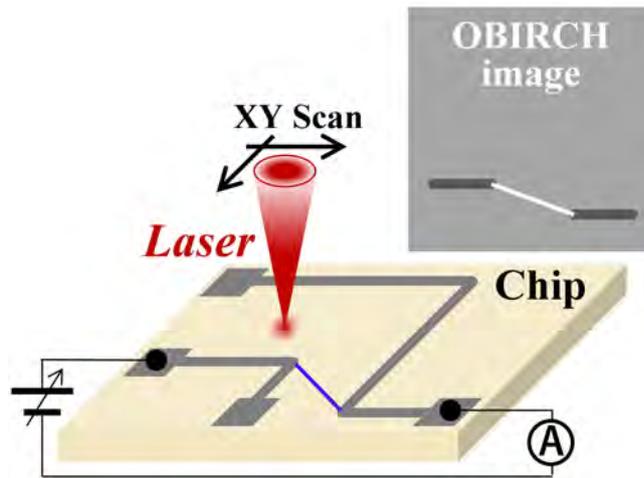


図 3.9: OBIRCH による電流経路の観察の模式図.

■OBIRCH の開発の経緯

OBIRCH の技術的な源流は、Optical Beam Induced Current (OBIC) [79–81] である。OBIC は、半導体デバイスのチップ部にバイアス電圧を印加した状態でチップに対しレーザによる 2 次元走査を実施する。OBIC では、レーザが励起した電子・正孔対の再結合時に生じる光電流を検出しレーザの走査位置と同期させ故障箇所を絞込む。OBIC を用いることで、pn 接合部に起因する故障箇所を絞込むことができる。

OBIRCH は、OBIC の測定系の新たな使用方法として 1993 年に K. Nikawa らによって提案された [73]。OBIC と OBIRCH の主な違いは、光電流ではなく温度変化に伴う抵抗変動を励起する目的でレーザを活用する点にある。開発初期の段階では模擬配線 (配線 TEG: Test Element Group) に対してだが、OBIRCH により、1) アルミニウム配線中の空隙を特定可能なこと [73]、2) 配線中に生じたシリコンの析出箇所を特定可能なこと [82]、3) これらの空隙とシリコン析出箇所の特定可能な最小の大きさ [74]、について報告された。

■OBIRCH の発展

1996 年、K. Nikawa らによって波長 $1.3 \mu\text{m}$ 程度の近赤外レーザを利用する IR-OBIRCH (InfraRed-OBIRCH) が提案された [75]。開発当初の OBIRCH では、OBIC の測定系を流用していたため、可視光レーザを利用しており光電流がノイズとなっていた。近赤外光のエネルギーはシリコン基板のバンドギャップよりも小さいため、IR-OBIRCH 法では光電流が生じなくなり、信号の S/N 比が向上した。近赤外光はシリコン基板を透過可能ため、シリコン基板の裏面側からの観察も可能となった [83]。照射するレーザを強度変調し電流変動の信号を位相検波することで、OBIRCH の空間分解能を向上可能なことが提案された [84]。OBIRCH に近接場光を利用する故障箇所絞り込み技術も提案されている [85, 86]。

OBIRCH は、一般に、定電圧を印加した状態で電流変動を観察し故障箇所を絞込む。一方、定電流を流した状態で電圧変動を観察し故障箇所を絞込む方法も提案されている。定電圧方式と定電流方式では、故障によって信号の出方が異なるという報告がある [83]。E.I. Cole らによって、短絡故障の場合には定電流方式の方が高感度に故障箇所を絞込める場合があると報告された [87, 88]。しかしながら、どのような故障に

対し定電圧方式と定電流方式のどちらの方が優れているかという議論に決着はついていない。理想的には両者の方式を適用するべきだが、一般的には慣習的に定電圧方式のみ採用される場合が多いようである。

OBIRCH は故障解析の多くの事例においてその有用性が報告されており [89–94]，故障箇所絞込み技術のデファクトスタンダードとしての役割を果たすようになった。

3.3.2 パルス駆動型超音波顕微鏡に関する文献調査

■パルス駆動型超音波顕微鏡の開発の経緯

パルス駆動型の超音波顕微鏡 [95,96] は、パルス状の超音波の周波数成分に信号処理を施すことで、観察対象の音速を測定する。この発明以前の超音波顕微鏡 [97–101] は、音速測定において反射波の周波数成分を周波数走査により取得しており、音速像を一枚得るために多大な時間を要していた。

パルス駆動型超音波顕微鏡の開発により、音速像の取得に要する時間が大幅に短縮され、医療や生物学などの基礎研究で普及するようになった。

■パルス駆動型超音波顕微鏡のその後の発展

パルス駆動型超音波顕微鏡の開発当初は、音速測定の信号処理の都合から観察対象の生体組織などを厚さ 100 μm 程度の切片として切り出す必要があり、組織切片の作成可能な試料への適用に限られていた。これに対し、反射波の強度から観察対象の固有音響インピーダンスを計測可能な音響インピーダンス顕微鏡 [102–106] が発明され、切片への加工が難しい組織や細胞などの観察へもパルス駆動型超音波顕微鏡が応用されるようになった。音響インピーダンスの較正法について、スカラー回折理論や収差の計算に基づいた議論がなされている [107–112]。

パルス駆動型超音波顕微鏡は、音速や音響インピーダンスといった、生体組織や生体細胞の音響物性の定量的な評価技術として様々な研究に応用されている [113–116]。

■三次元音響インピーダンス顕微鏡

近年になって、試料内部の音響インピーダンスを三次元的に定量化可能な、超音波の反射と透過の原理に基づいた信号処理の方法論が考案された [117–119]。従来の超音波顕微鏡では試料表面の二次元的な観察しか実施できなかったが、この発明によって、超音波を用いた試料内部の顕微的かつ三次元的な定量評価が可能となった。超音波顕微鏡の新しい形態としての三次元音響インピーダンス顕微鏡は、すでに、皮膚科学の基礎研究 [120,121] や培養細胞の三次元的な構造観察 [122,123] などへの応用が始まっており、超音波顕微鏡を用いた新たな研究領域を開拓しつつある。

第 4 章

電流経路可視化の基礎実験と数値解析

4.1 本章の目的と位置づけ

第 4 章では、超音波加熱を利用し SOBIRCH で電流経路を観察可能か、封止樹脂に覆われていない試料を用いて検証した。図 4.1 に、本章の要約を示している。

超音波は、非破壊的な計測技術の一つとして、幅広い分野に応用されている。一般的な超音波計測では、物体の内部に存在する音響物性が不均一な箇所からの反射波などを利用する。しかし、本研究で提案する SOBIRCH のような、超音波を加熱の目的で用いる計測技術の研究報告はほとんどみられない。

故障箇所絞込みへの適用に先立ち、SOBIRCH で電流経路を観察可能なこと、および、得られた信号が超音波加熱に起因したものであることを検証する必要がある。検証のため、半導体デバイスのチップ部の配線構造を模し封止樹脂に覆われていない試料を用いて実験を行った。この試料で SOBIRCH 信号の強度を測定し、測定結果と計算結果の比較より、SOBIRCH 信号と超音波加熱の関係について議論した。

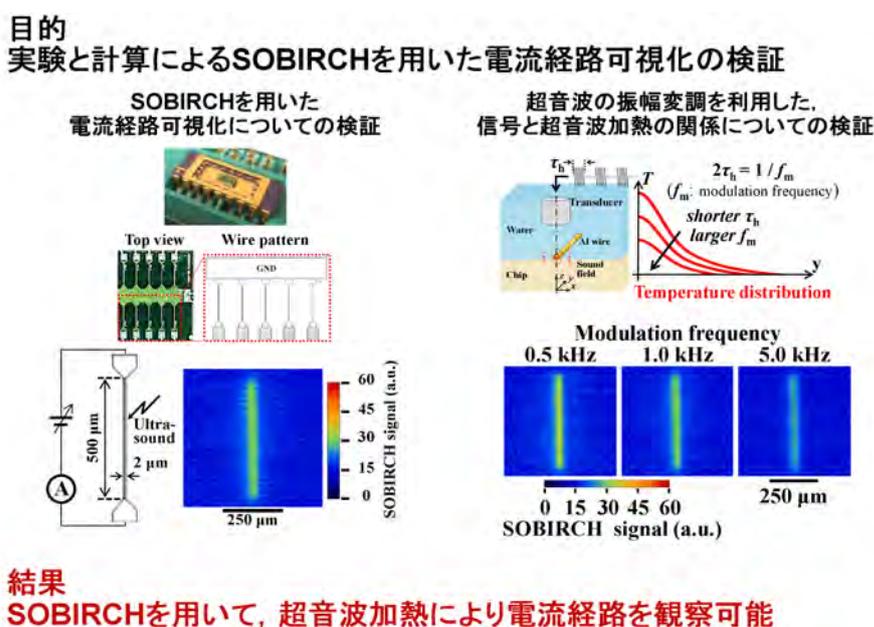


図 4.1: 第 4 章の要約。

4.2 封止樹脂に覆われていない電流経路の可視化

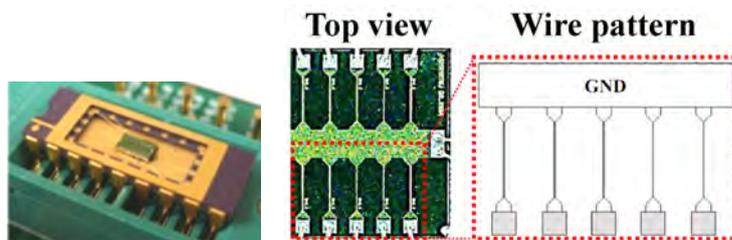
4.2.1 本節の目的と内容

半導体デバイスのチップ部の配線構造を模した封止樹脂に覆われていない試料を用いて、SOBIRCHにより電流経路の可視化が可能か実験的に検証した。

4.2.2 測定試料の構成と測定条件

4.2.2.1 試料の構成

図 4.2 に、本節の検討で用いる測定試料の構造を示す。この試料は、半導体デバイスの配線の基本的な構造を模している。図 4.2(a) には、試料の外観を示している。試料は封止樹脂に覆われておらず、表面にはアルミニウムの配線が蒸着されている。図 4.2(b) には、試料表面の配線パターンを示している。



(a) 試料の外観.

(b) 試料表面の配線パターン.

図 4.2: 電流経路可視化の検証のために使用した試料.

4.2.2.2 測定条件

表 4.1 は測定条件を示している。図 4.2 の線幅 $2\ \mu\text{m}$ の配線を観察対象とし、80 MHz の超音波を照射して測定を行った。表 4.2 は、測定で使用した超音波振動子の形状と中心周波数を示している。

表 4.1: SOBIRCH による線幅 $2\ \mu\text{m}$ の配線の電流経路可視化における測定条件.

Bias voltage (mV)	Voltage applied to transducer (V)	Width of Al wire (μm)	Carrier frequency (MHz)
500	26	2	80

表 4.2: 第 4.2 節の測定で使用した超音波振動子の形状と中心周波数.

Center frequency (MHz)	Focal length (μm)	Aperture radius (μm)
80	3200	1200

4.2.3 実験結果

図 4.3 に、SOBIRCH を用いて図 4.2 の試料に対し電流経路の可視化を試みた実験結果を示す。図 4.3 の中央にある緑色の直線状の部分が、SOBIRCH により可視化された電流経路である。図 4.3 において、幅 $2\ \mu\text{m}$ 、長さ $500\ \mu\text{m}$ のアルミ配線の電流経路が可視化できた。

図 4.3 では、線幅 $2\ \mu\text{m}$ の配線が $50\ \mu\text{m}$ 程度に広がって撮像されている。W.J. Fry と F. Dunn が導出した近似式 [124, 125] を用いると、表 4.2 の超音波振動子の強度が $3\ \text{dB}$ 低下する点までを含んだ焦点領域の直径は、 $25\ \mu\text{m}$ である。この焦点領域を熱源として温度分布が形成されるため、SOBIRCH で得られる電流経路像の広がりや温度分布と同程度もしくはそれ以上に広がる。以上の理由で、線幅 $2\ \mu\text{m}$ の配線が $50\ \mu\text{m}$ 程度に広がって撮像されたと考えられる。

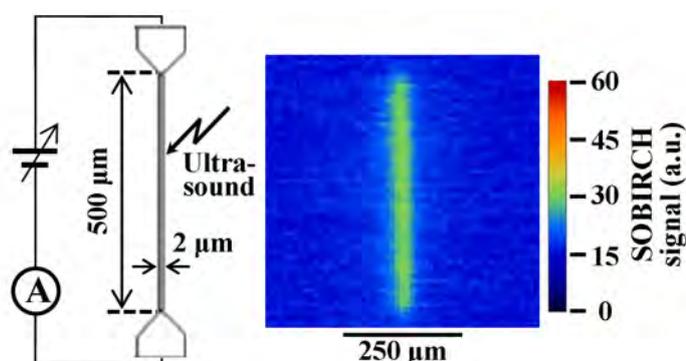


図 4.3: 封止樹脂に覆われていない試料に対する SOBIRCH を用いた電流経路の可視化。

4.2.4 本節のまとめ

電流経路が封止樹脂に覆われていない試料においては、SOBIRCH により電流経路を可視化できた。

4.3 超音波加熱と信号強度の関係

4.3.1 本節の目的と内容

本節では、SOBIRCH を用いた電流経路の観察において、検出される電流変動が超音波加熱により誘起されていることを実験と数値計算から検証した。

SOBIRCH では、電流変動の高感度な検出のため位相検波を利用する。位相検波のため、加熱に使用する超音波には振幅変調が掛けられている。変調周波数の半周期が超音波の持続時間を決定するため、変調周波数が高いほど超音波による加熱時間が短くなる。加熱時間が短くなることで温度上昇量が低下し SOBIRCH の信号強度も低下すると予想される。本節では、位相検波の変調周波数を変化させ SOBIRCH の信号強度を測定し、数値計算と比較した。実験では前節と同じ試料を使用した。

4.3.2 計算モデルの定義

4.3.2.1 振動子の出射パワー

■振動子の種々のパラメータ

表 4.3 [126] に、表 4.2 の振動子からの出射パワーの計算で使用した物性値を示す。実験で用いた振動子には圧電高分子 (ポリフッ化ビニリデンと三フッ化エチレンの共重合体; PVDF/TrEE) が使用されている。

表 4.3: 出射パワーの計算で使用した PVDF の音響物性 [126].

Parameters	Symbols	Units	Values
Center frequency	f_C	MHz	80
Speed of sound	c	m/s	2370
Focal length	r	μm	3200
Aperture radius	a	μm	1200
Aperture half angle	θ_0	$^\circ$	22
Electro-mechanical factor	K_t	-	0.3
Relative permittivity	ϵ_r	-	5.3
Loss tangent	$\tan \delta$	-	0.12

■PVDF の厚さと面積

出射パワーの計算に際し、振動子に使用されている圧電高分子膜 (PVDF) は中心周波数の半波長と同等な厚さをもつと仮定する。また、この並行平板コンデンサの面積は振動子の焦点距離と開口半径から決まる立体角より算出する。

振動子の中心周波数は 80 MHz であるため、PVDF 中の超音波の波長および半波長は、

$$\lambda = \frac{c}{f_C} = \frac{2370 \text{ m/s}}{80 \text{ MHz}} \cong 30 \mu\text{m}, \quad \frac{\lambda}{2} \cong 15 \mu\text{m}. \quad (4.1)$$

この PVDF 中での 80 MHz の超音波の半波長 $\lambda/2$ を PVDF の厚さと等しいと仮定する。

次に、PVDF の面積を計算する。振動子は球面で超音波を集束させている。図 4.4 に、立体角を用いた球面振動子の面積の計算モデルを示す。図 4.4 において、微小角 $d\theta$ が球表面に作る帯状の微小面積 dS は、

$$dS = 2\pi r \sin \theta r d\theta. \quad (4.2)$$

圧電高分子の面積 S は中心軸から開口半角 θ_0 まで dS を積分することで得られる。ここで、 θ_0 は焦点距離 r と開口半径 a より、

$$\theta_0 = \sin^{-1} \left(\frac{a}{r} \right) \cong 22^\circ \quad (4.3)$$

と求まる。したがって、圧電高分子の面積 S は式 (4.4) のような積分から計算できる。

$$S = \int_{0^\circ}^{\theta_0} dS = \int_{0^\circ}^{22^\circ} 2\pi r^2 \sin \theta d\theta = 2\pi(3200 \mu\text{m})^2(1 - \cos 22^\circ) \doteq 4.7 \text{ mm}^2. \quad (4.4)$$

■PVDF の静電容量と振動子の出射パワー

PVDF 中の半波長 $\lambda/2$ をコンデンサの厚さとし面積を S とすれば、その静電容量 C_c は、

$$C_c = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{\lambda} = 5.3 \times 8.85 \times 10^{-12} \times \frac{4.7 \text{ mm}^2}{15 \mu\text{m}} \doteq 15 \text{ pF}. \quad (4.5)$$

振動子への印加電圧を 26 V とする。このとき、PVDF の電気機械変換係数 K_t と $\tan \delta$ より、出射パワー P は式 (4.6) のように計算される。

$$P = 2\pi f_C C_c V^2 \tan \delta K_t = 2\pi \times 80 \text{ MHz} \times 15 \text{ pF} \times (26 \text{ V})^2 \times 0.12 \times 0.3 \doteq 183 \text{ mW}. \quad (4.6)$$

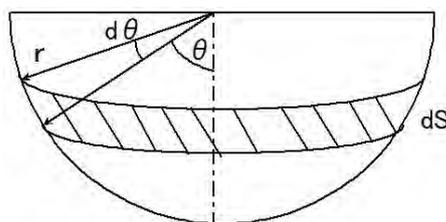


図 4.4: 立体角を用いた球面振動子の表面積の計算。

4.3.2.2 音響場

■球面振動子を円形ピストンとして近似

振動子が熱源として形成する音響場をフーリエ光学に基づいて計算する。振動子の焦点位置を観察対象に合わせるため、ここでは、焦点近傍の音圧分布のみに着目してモデル化する。

図 4.5 に、測定で使用した振動子の形状を示す。図 4.5 において、振動子の圧電膜の深さ h は焦点距離 r と開口半角 θ_0 より

$$h = r - r \cos \theta_0 = r(1 - \cos \theta_0) \quad (4.7)$$

と表せる。ここで、 r と h の比を計算すると

$$\frac{h}{r} = 1 - \cos \theta_0 = 1 - \cos 22^\circ \doteq 0.07 \quad (4.8)$$

となり、圧電膜の深さ h は焦点距離 r に比べ十分小さい。したがって、振動子の音場を円形ピストンの放射音場として近似的に計算する。

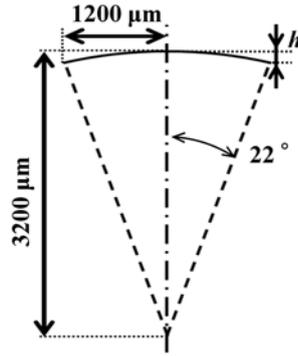


図 4.5: 中心周波数 80 MHz の振動子の形状.

■円形ピストンが形成する音響場

振動子の中心軸上に z 軸を取り、振動子の底面を原点にとると、円形ピストンが形成する音響場の焦点近傍の強度分布 $I(R)$ はフーリエ光学のエアリー像 [127] と等価となり、一次の第一種ベッセル関数 J_1 を用いて式 (4.9) のように表される.

$$I(R) = \left(\frac{\pi w^2}{\lambda z} \right)^2 \left[2 \frac{J_1(kwR/z)}{kwR/z} \right]^2. \quad (4.9)$$

式 (4.9) において、 w は開口半径、 λ は波長、 k は波数、 R は焦平面上の振動子の中心軸上からの半径方向の距離を示している. 式 (4.9) の $I(R)$ で計算される音圧の強度分布を熱源の分布として、電流変動の計算に使用する.

4.3.2.3 水中での音響パワーの減衰

水中での音圧波動の減衰係数は $21.1 \times 10^{-15} \text{ s}^2/\text{m}$ (25 C°) [128] を採用する. 水中では超音波の周波数の 2 乗に比例して減衰係数が大きくなり、周波数を f 、伝搬距離を x として計算すると式 (4.10) のようになる.

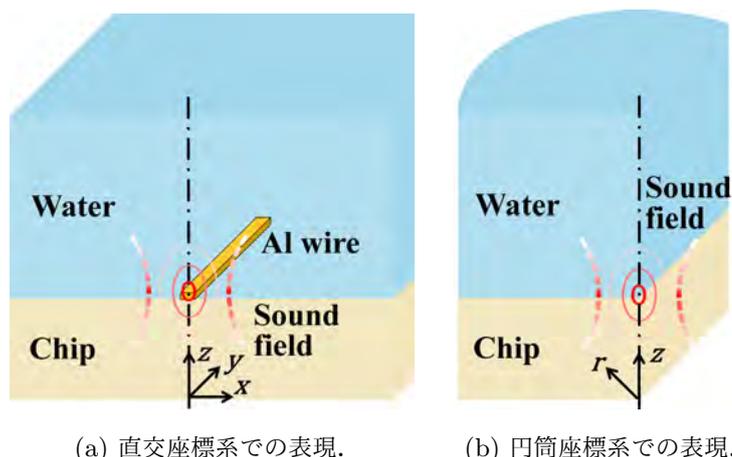
$$\eta = \exp(-2 \times 21.1 \times 10^{-15} \times f^2 x) \quad (4.10)$$

4.3.2.4 電流経路近傍の温度分布の計算モデル

■円筒座標系を用いた計算モデルの近似

先述の振動子の出射パワーと音響場を用いて熱源を定義し、電流経路の近傍に生じる温度分布を計算する. 図 4.6 に、測定試料を軸対象として近似した温度分布を計算するための解析モデルを示す.

図 4.6(a) に試料の構造を直交座標系で表現した時の計算モデルを示す. このままでは三次元の熱伝導問題を数値解析する必要がある. 計算量の低減のため、アルミ配線が熱伝導問題に寄与する影響は小さく無視できるものとして、計算モデルを軸対称に近似する. 図 4.6(b) に、軸対称な円筒座標系での計算モデルを示す. 円筒座標系で表現された計算モデルは、熱抵抗と熱容量で記述される 2 次元の熱等価回路で空間的に離散化する.



(a) 直交座標系での表現.

(b) 円筒座標系での表現.

図 4.6: 超音波振動子が形成する音響場を熱源とした熱伝導解析の計算モデル.

■線の方法に基づいた多元連立常微分方程式の導出

図 4.7 に、空間離散化した二次元熱等価回路内の任意の計算ノードを示す. 図 4.7 において、熱回路における熱流の出入りに関してキルヒホッフの電流則を適用すると式 (4.11) のように表せる.

$$C_h \frac{\partial T_0}{\partial t} = \frac{1}{R_1}(T_1 - T_0) - \frac{1}{R_2}(T_0 - T_2) - \frac{1}{R_3}(T_0 - T_3) - \frac{1}{R_4}(T_4 - T_0) + Q_{in}. \quad (4.11)$$

ここで C_h , R , T , Q はそれぞれ熱容量, 熱抵抗, 温度, 入力熱量を意味している. この式を整理すると, 次のようになる.

$$C_h \frac{\partial T_0}{\partial t} = -\frac{1}{R_0}T_0 + \frac{1}{R_1}T_1 + \frac{1}{R_2}T_2 + \frac{1}{R_3}T_3 + \frac{1}{R_4}T_4 + Q_{in}, \left(\frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right). \quad (4.12)$$

この式 (4.12) を図 4.6 の軸対称モデルの半径 r の方向に連立させると, 多元の一階連立微分方程式が得られる. この半径 r 方向の連立微分方程式を軸対称モデルの深さ z 方向に対して更に連立させて行列表示すると式 (4.13) のようになる.

$$\frac{d}{dt}\mathbf{T} = \mathbf{A}\mathbf{T} + \mathbf{B}\mathbf{Q}. \quad (4.13)$$

式 (4.13) で, \mathbf{T} , \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{Q} はそれぞれ, 温度列ベクトル, 熱伝導係数行列, 熱容量係数行列, 入力熱量列ベクトルである. 以上のような熱伝導解析のモデルを Matlab 上に構築し, 温度分布の過渡応答を計算する.

式 (4.13) の熱伝導解析モデルの非定常解を求めるため, Matlab 上では常微分方程式ソルバの ode15s [129, 130] を用いて計算を行った. 数値解析により得られた温度分布から抵抗変動を算出し, 算出された抵抗変動を用いて電流の変動量を算出することで, SOBIRCH の信号強度を計算した.

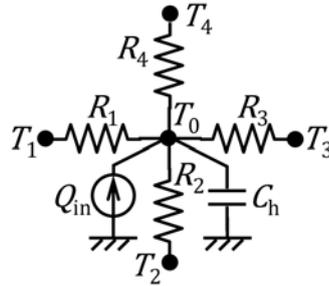


図 4.7: 二次元熱伝導解析で使用する熱等価回路の基本ノード。

4.3.3 結果と考察

4.3.3.1 測定条件

表 4.4 に測定条件を、表 4.5 に測定で使用した超音波振動子の形状と中心周波数を示している。前節と同じ測定条件と超音波振動子を使用し、変調周波数を変化させて SOBIRCH 信号の強度を測定した。

SOBIRCH 像の取得の際の走査速度は、画像の 1 pixel あたりにおける振動子の滞在時間が変調周波数の 10 周期となるように設定した。

表 4.4: SOBIRCH による線幅 $2 \mu\text{m}$ の配線の電流経路可視化における測定条件。

Bias voltage (mV)	Voltage applied to transducer (V)	Width of Al wire (μm)	Carrier frequency (MHz)
500	26	2	80

表 4.5: 第 4.2 節の測定で使用した超音波振動子の形状と中心周波数。

Center frequency (MHz)	Focal length (μm)	Aperture radius (μm)
80	3200	1200

4.3.3.2 実験結果

図 4.8 には、変調周波数を 0.5 kHz, 1.0 kHz, 5.0 kHz に設定した SOBIRCH 像を示している。図 4.8 では、変調周波数が高くなるにしたがって、信号強度も低下している。

振動子から照射される超音波は Duty 比 50 % の方形波で振幅変調されており、変調周波数が高いほど一周あたりの超音波の持続時間が短くなる。超音波の持続時間が短くなると加熱に要する時間も短くなるため、配線近傍の温度上昇が小さくなる。温度の上昇量が小さくなったことで電流の変動量も小さくなり、信号強度が低下したと考えられる。図 4.8 より、変調周波数が高くなるに従いに SOBIRCH の信号強度が低下する傾向が確認された。

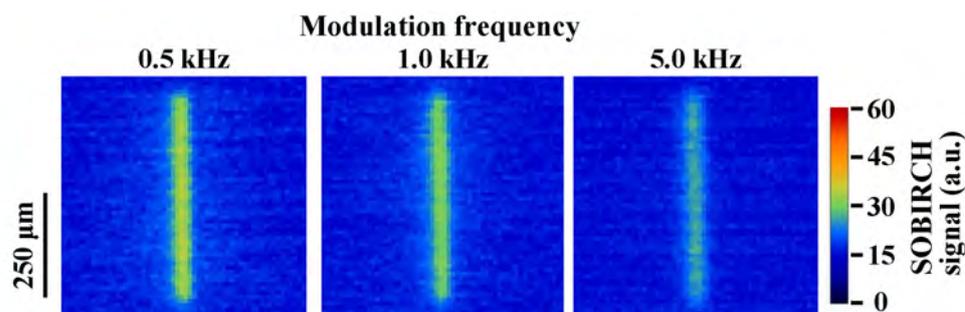


図 4.8: 変調周波数を変化させたときの SOBIRCH 像。

4.3.3.3 計算結果との比較

図 4.9 に、変調周波数と SOBIRCH の信号強度の関係を示す。図 4.9 の横軸は変調周波数、縦軸は SOBIRCH 信号の強度を示している。図 4.9 中のプロットは測定結果、実線は計算結果である。図 4.9 では、測定結果と計算結果のそれぞれの系列において 1 kHz での値を基準に規格化している。図 4.9 では、測定結果と計算結果の傾向がよく一致した。

測定と計算の傾向がよく一致したことから、図 4.9 の右肩下がりの傾向は、一周あたりでの超音波の持続時間の短縮に伴う温度上昇量の低下に起因するものと解釈できる。

したがって、図 4.9 において測定結果と熱解析による計算結果の傾向がよく一致したことから、0.1 kHz から 10 kHz の範囲においては、超音波加熱が SOBIRCH 信号の主たる要因であると判断できる。

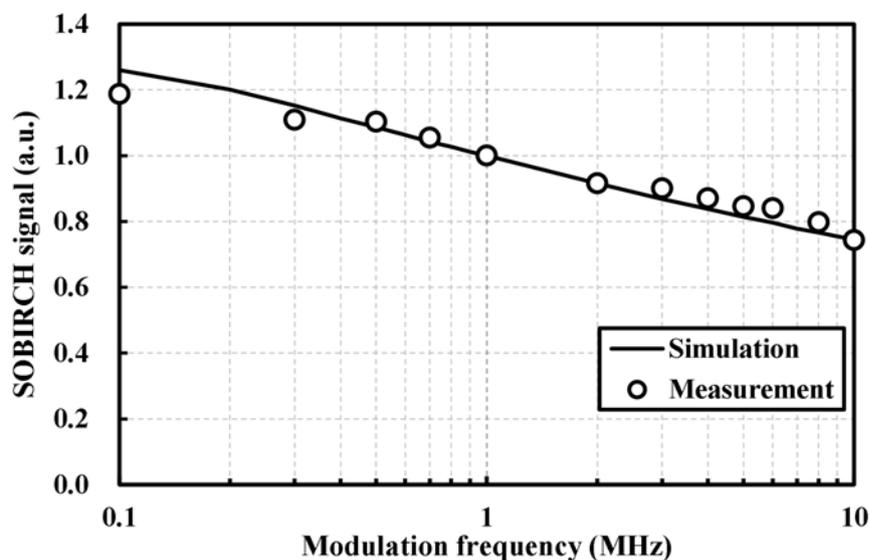


図 4.9: 変調周波数と SOBIRCH の信号強度の関係。

4.3.4 本節のまとめ

本節では、SOBIRCH で信号として検出される電流変動が超音波加熱に起因していることを実験的に検証した。

変調周波数を変化させたときの測定結果と計算結果の傾向の一致から、SOBIRCH の信号は超音波加熱により誘起されていることを確認した。

4.4 本章のまとめ

本章では、SOBIRCH で電流経路の観察が可能なこと、SOBIRCH の信号が超音波加熱により誘起されていることを、半導体デバイスのチップ部の配線構造を模した試料を用意して実験的に検証した。

配線が封止樹脂に覆われていない試料に対し、電流経路を可視化できた。この試料に対し、ロックインアンプの変調周波数を変化させた測定において、測定結果と計算結果の傾向が一致した。測定と計算の傾向の一致より、SOBIRCH 信号が超音波加熱により誘起されていることを確認した。

本章の検討より、超音波加熱を用いることで半導体デバイスの配線に対し電流変動が誘起され、SOBIRCH により電流経路を観察可能なことを明らかにした。

第 5 章

封止樹脂を介した超音波加熱による 電流経路の観察

5.1 本章の目的と位置づけ

第 4 章の議論から、SOBIRCH で電流経路を観察可能なことが示された。しかし、第 4 章で電流経路を観察した試料は封止樹脂に覆われていないものだった。第 5 章では、封止樹脂を介しても SOBIRCH により電流経路を観察可能か検証した。図 5.1 には、本章の要約を示している。

第 5.2 節で、封止樹脂中の充填剤による超音波の散乱の影響を調査した。第 5.3 節では、電流経路を観察可能な封止樹脂の厚さについて検証した。第 5.4 節では、封止樹脂での超音波の共振が SOBIRCH の信号強度に与える影響と適切な超音波の周波数の選択による信号強度の向上について検証した。第 5.5 節では、反射波の周波数成分に基づいた共振周波数の推定方法について検討した。

第 5.6 節では、本章の議論から得られた知見を商用の半導体デバイスでの故障箇所の見逃しに適用した。

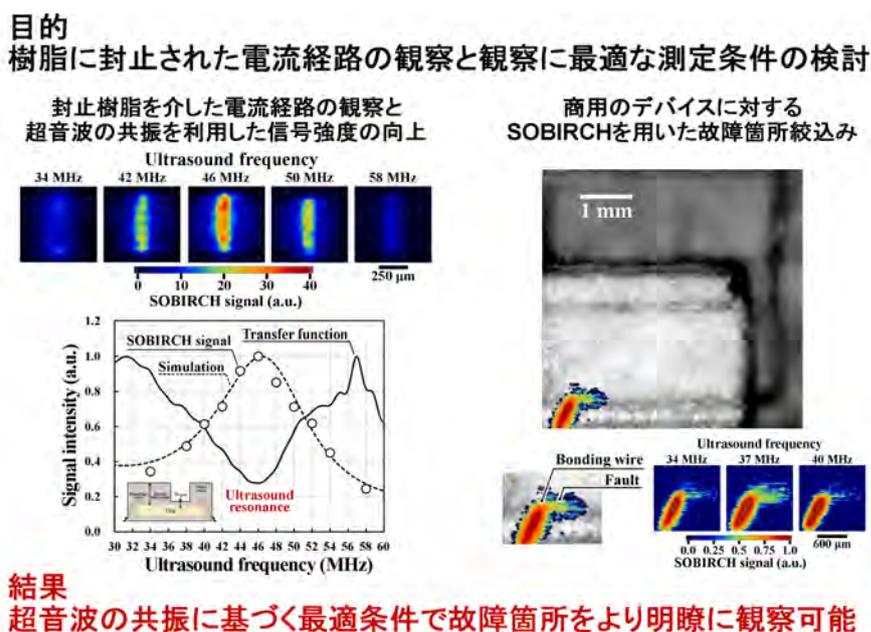


図 5.1: 第 5 章の要約.

5.2 封止樹脂に添加されている充填剤の影響

5.2.1 本節の目的と内容

本節では、封止樹脂の中に含まれる充填剤の影響について調査し、SOBIRCHにより封止樹脂の開封前に電流経路を観察可能か検討した。

封止樹脂の母材には、一般的に、エポキシ樹脂などの熱硬化性樹脂が用いられている。この樹脂に対して、半導体デバイスのチップを外部環境からの保護等を目的として種々の添加材が混ぜられている。添加剤としては光の透過性を下げるための炭素粉末や、難燃性向上のための芳香族化合物、熱伝導性の向上を目的としたシリカ粒子などの充填剤がある。炭素粉末や芳香族化合物などは粒子の大きさが超音波の波長に対してきわめて小さいため、SOBIRCHにおいてさほど問題にならないことが予想される。しかし、シリカ粒子を代表とする充填剤はその粒径が比較的大きく、超音波に対して散乱体として働くことが予想される。

本節では、樹脂中に添加された充填剤の散乱の影響を調査した。

5.2.2 測定試料の構成と測定条件

5.2.2.1 試料の構成と測定条件

本節では、第4章の実験で使用した試料をエポキシ樹脂で封止し、実験を行った。表5.1に、封止材として使用したエポキシ樹脂についての概略を示す。厚さ500 μm のエポキシ樹脂に粒径約16 μm のシリカ粒子を充填剤として添加した。実験では、表5.2に示すように、充填率0 wt%のエポキシ樹脂で封止された試料と、充填率35 wt%のエポキシ樹脂で封止された試料を用意した。測定条件は第4章での実験と同様に、表5.3と表5.4のものを使用した。

表 5.1: 本節の測定で使用する封止材の厚さと充填剤.

Base material	Thickness (μm)	Filler	Particle diameter of filler (μm)
Epoxy	500	SiO ₂	16

表 5.2: エポキシ樹脂中のシリカ粒子の充填率.

Sample No.	Filling rate (wt%)
1	0
2	35

表 5.3: SOBIRCH による線幅 2 μm の配線の電流経路可視化における測定条件.

Bias voltage (mV)	Voltage applied to transducer (V)	Width of Al wire (μm)	Carrier frequency (MHz)
500	26	2	80

表 5.4: 第 5.2 節の測定で使用した超音波振動子の形状と中心周波数.

Center frequency (MHz)	Focal length (μm)	Aperture radius (μm)
80	3200	1200

5.2.3 80 MHz の超音波を用いた測定

表 5.3 と表 5.4 の条件で測定を実施した. 結果として, 充填率が 0 wt% においては電流経路を可視化できたが, 充填率が 35 wt% の試料では, 電流経路を可視化できなかった.

この測定では, 超音波の周波数は 80 MHz に設定した. 充填率が 35 wt% の試料で電流経路を可視化できなかった原因は, エポキシ樹脂に添加した充填剤が散乱体として強く働いたためと考えられる.

5.2.4 散乱体のサイズパラメータを用いた考察

散乱体のサイズパラメータを用いて, 充填剤による超音波の散乱の影響を簡易的に考察する. 散乱体粒子の直径を D , 音波の波長を λ とすると散乱体のサイズパラメータ η は式 (5.1) のように定義されている [131, 132].

$$\eta = \frac{\pi D}{\lambda}. \quad (5.1)$$

サイズパラメータ η の値によって散乱の様相を以下のように分類することができる.

$\eta \gg 1$: 幾何光学近似,

$\eta \approx 1$: Mie 散乱,

$\eta \ll 1$: Rayleigh 散乱.

充填剤が添加された樹脂内の音速は約 3750 m/s なため 80 MHz の波長 λ は約 47 μm であり, サイズパラメータ η は約 1.07 であった. したがって, エポキシ樹脂の充填剤では超音波の Mie 散乱が生じていると考えられる. Mie 散乱は, 一般に, 超音波の進行方向からみた後方へ超音波が強く散らされる傾向にある. 超音波の周波数が 80 MHz の場合には, 充填剤によって超音波が強く散乱され観察対象の電流経路へ到達する超音波のパワーが著しく低下したと考えられる. 結果的に, 温度上昇が小さくなり検出可能な大きさの電流変動を誘起出来ず, 電流経路を可視化できなかったものと解釈できる.

一方で, 超音波の周波数を下げ波長を長くすることにより散乱モデルが Rayleigh 散乱に近づく. Rayleigh 散乱では, 一般に, 散乱体の大きさが超音波の波長に比べて小さいほど, 散乱の影響が小さくなる傾向にある. したがって, 超音波の周波数を 80 MHz よりも低く設定することで充填剤による散乱の影響が抑えられ, 電流経路を観察できる可能性がある.

5.2.5 40 MHz の超音波を用いた測定

5.2.5.1 充填剤が添加された樹脂での再実験

散乱体のサイズパラメータを用いた簡易的な考察から、充填剤の粒径を考慮し周波数を低くすると電流経路を観察できる可能性が示唆された。ここでは、中心周波数が 40 MHz の超音波振動子を用意し測定を行った。

表 5.5 に用意した振動子の形状と中心周波数を示す。樹脂内での 40 MHz の波長 λ は約 93 μm であり、サイズパラメータ η は約 0.54 であった。このことから、超音波の散乱モデルは Rayleigh 散乱となることが予想されるため、40 MHz の超音波により電流経路を観察可能と期待される。前節および、80 MHz の超音波での測定と同様な条件を設定し測定を行った。

図 5.2 に充填率が 0 wt% で充填剤が添加されていないエポキシ樹脂と充填率が 35 wt% で充填剤が添加されたエポキシ樹脂を介した測定の結果を示す。40 MHz の超音波を用いた測定では、充填率が 35 wt% で充填剤が添加された試料においても電流経路を可視化できた。

図 5.2 では、充填剤が添加された樹脂に覆われた試料の信号強度が低下している。充填剤による散乱の影響で電流経路への超音波の到達パワーが減少し信号強度が低下したと考えられる。しかし、サイズパラメータを用いた考察で予想された通り、散乱体の粒径を考慮し超音波の周波数を低くすることで、SOBIRCH により充填剤が添加された樹脂を介しても電流経路を観察可能なことが示された。

表 5.5: 第 5.2 節の再測定で使用した超音波振動子の形状と中心周波数。

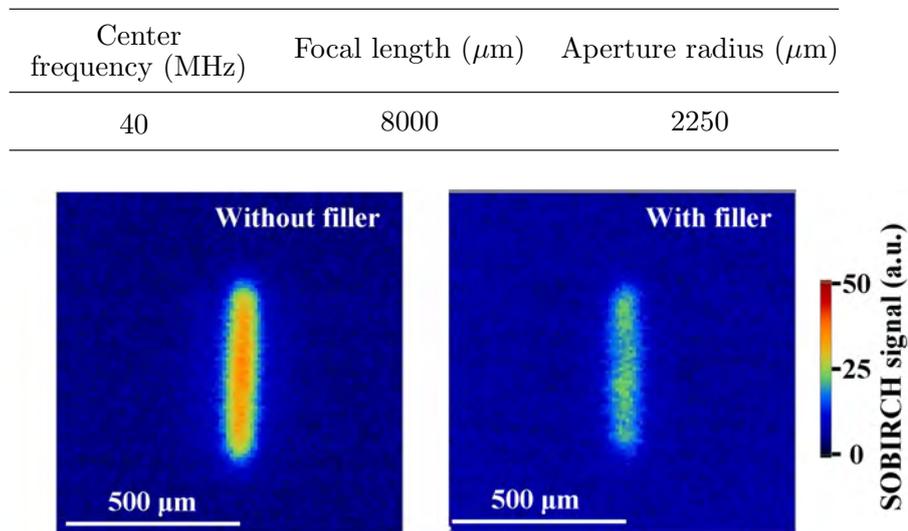


図 5.2: エポキシ樹脂を介した超音波加熱による電流経路の可視化。

5.2.5.2 変調周波数を変化させたときの信号強度

■樹脂中での音響場の計算

信号強度における熱源の分布を定義するため、表 5.5 の超音波振動子が形成する音響場を計算する。今回の音響場解析では、音響結合剤としての水と試料を覆う樹脂の界面で生じる超音波の屈折を考慮する必要がある。計算では、計算領域を水と樹脂の二つの媒質が接する半無限媒質とし、波数空間解析 [111,133] により音響場を計算した。音響場の計算においては、樹脂中の充填剤による散乱の影響は無視した。

図 5.3 に、音響場解析で使用した振動子の形状と音響場解析の結果を示す。図 5.3(a) に超音波振動子の形状を示す。図 5.3(b) に、周波数を 40 MHz としたときの、図 5.3(a) の振動子が形成する音響場の解析結果を示す。

図 5.3(b) の計算では水の音速を 1500 m/s、樹脂の音速を 3750 m/s として計算した。図 5.3(b) より水と樹脂の界面での音波の屈折の様子が確認される。この音響場の数値解析より得られた音圧分布を用い、温度分布の計算のための熱源の分布を再定義し、第 4 章で導入した熱伝導解析により SOBIRCH の信号強度を計算した。

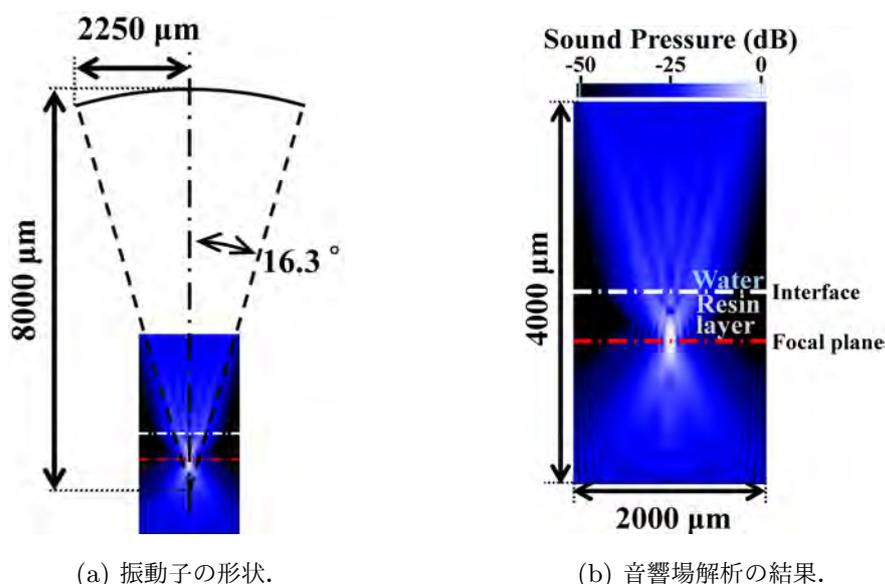


図 5.3: 波数空間解析 [111, 133] を利用した中心周波数 40 MHz の振動子が形成する音響場の計算。

■実験と計算の比較

樹脂に覆われた試料においても SOBIRCH 信号が超音波加熱に起因するものであることを検証するために、実験を行った。実験では、図 5.2 と同様の条件でロックインアンプの変調周波数を変化させながら SOBIRCH 信号の強度を測定し、計算結果と比較した。

図 5.4 に、SOBIRCH 信号の測定結果と計算結果の比較を示す。図 5.4 の横軸は変調周波数、縦軸は信号強度である。図 5.4 中のプロットは測定結果を示し、実線は計算結果を示している。測定と計算のそれぞれの系列は、充填剤ありかつ変調周波数 1 kHz の場合の値で規格化されている。

図 5.4 において、測定結果と計算結果の傾向がよく一致した。この結果より、樹脂に覆われた試料におい

ても、SOBIRCH 信号が超音波加熱に起因したものであると確認された。

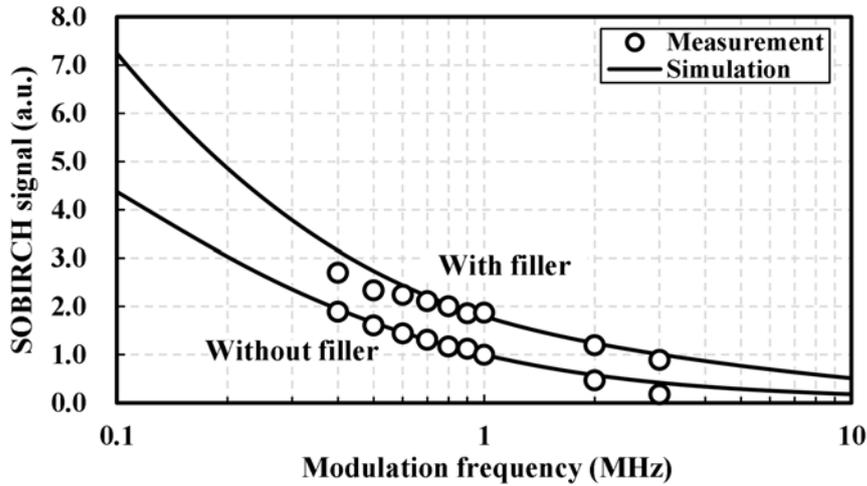


図 5.4: 変調周波数と SOBIRCH 信号の強度の関係。

5.2.6 本節のまとめ

本節では、半導体デバイスの封止樹脂に添加されている充填剤の影響を実験的に検証した。粒径 $16 \mu\text{m}$ のシリカ粒子が 35 wt% の充填率で添加されたエポキシ樹脂を介した測定では、超音波の周波数を 40 MHz に設定すると電流経路を可視化できた。封止樹脂の開封前に半導体デバイスのチップ部にある電流経路を SOBIRCH を用いることで観察可能なことが示唆された。

また、充填剤が添加された試料に対してもロックインアンプの変調周波数を変化させた測定を実施し、SOBIRCH 信号の測定結果と計算結果を比較した。測定結果と計算結果の傾向の良好な一致から、封止樹脂を介した電流経路の観察においても SOBIRCH 信号は超音波加熱に起因したものであることが確認された。

5.3 封止樹脂の厚さと信号強度の関係

5.3.1 本節の目的と内容

本節では、商用の封止樹脂の厚さの範囲において、SOBIRCH により電流経路を観察可能か検証する。

前節での検討より、封止樹脂の充填剤が超音波を散乱させ結果として SOBIRCH 信号の強度を低下させることが示された。封止樹脂が極めて厚い場合には、SOBIRCH の測定系で検出可能な大きさの電流変動を超音波加熱で誘起できず、電流経路を可視化できないことが予想される。

一般的に、半導体デバイスのチップを覆う封止樹脂の商用の厚さは $300 \mu\text{m}$ から $1000 \mu\text{m}$ といわれている。本節では、6 種類の異なる厚さの封止樹脂に覆われた試料を用意し、封止樹脂の一般的な厚さの範囲で SOBIRCH による電流経路の観察が可能か実験を行った。

5.3.2 測定試料の構成と測定条件

5.3.2.1 測定試料

図 5.5 に、本節の測定で用いる試料の構造の模式図を示す。図 5.5(a) は、試料の金属配線のパターンを示している。測定対象の金属配線のパターンは、第 4 章で用いた試料と同様のものである。図 5.5(b) は、一般的な厚さの範囲の封止樹脂で図 5.5(a) の配線を覆った時の試料の断面の構造を模式的に示している。封止樹脂が薄い場合の考察のために、図 5.5(a) のような断面の構造をもつ試料において観察対象の金属配線の直上の封止樹脂のみを薄くした試料も用意した。図 5.5(c) は、封止樹脂の一部を薄くした試料の構造を示している。

本節の測定では、封止樹脂の厚さが $50\ \mu\text{m}$ から $1000\ \mu\text{m}$ の範囲で、5 つの試料を用意した。比較として図 5.5(a) の配線構造を有し、封止樹脂に覆われていない試料も用意した。以降では他の試料との対比として、便宜上、樹脂に覆われていない試料は封止樹脂の厚さが $0\ \mu\text{m}$ の場合と呼称する。

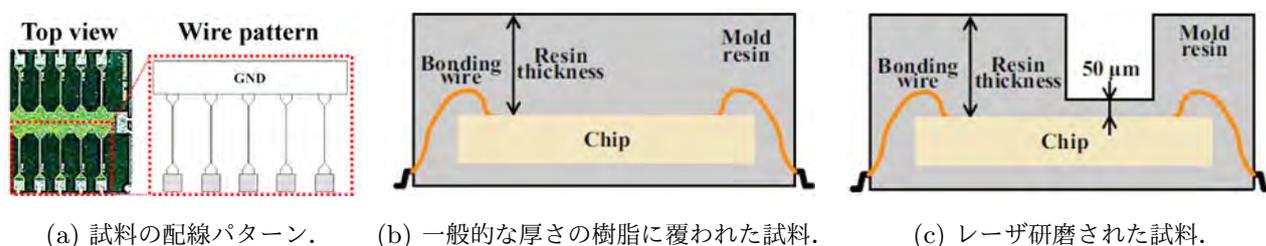


図 5.5: 封止樹脂の厚さの影響を調査するための試料の構造。

5.3.2.2 測定条件

表 5.6 と表 5.7 に、本節での測定条件を示す。第 4 章の結果を踏まえ、中心周波数が $40\ \text{MHz}$ の超音波振動子を使用し、 $1\ \text{kHz}$ の変調周波数を設定して測定を行った。第 4 章の場合と同様に、観察対象とする金属配線の配線幅は $2\ \mu\text{m}$ のものを選択した。

表 5.6: 第 5.3 節の実験で使用した超音波振動子の形状と中心周波数。

Center frequency (MHz)	Focal length (μm)	Aperture radius (μm)
40	8000	2250

表 5.7: 第 5.3 節の実験で使用した測定条件。

Bias voltage (mV)	Voltage applied to transducer (V)	Width of Al wire (μm)	Modulation frequency (kHz)
500	26	2.0	1.0

5.3.3 実験結果と考察

5.3.3.1 封止樹脂の厚さと信号強度の関係

■実験結果

図 5.6 に図 5.5 の試料に対する測定結果を示す。図 5.6 中の SOBIRCH 信号の強度は、封止樹脂の厚さが $320\ \mu\text{m}$ の試料での配線上の信号強度が 1 となるように規格化したのち、カラーバーを対数表示している。したがって、封止樹脂の厚さが $320\ \mu\text{m}$ の試料の信号強度が、図 5.6 中では 0 として表示されている。

封止樹脂が $1000\ \mu\text{m}$ と厚い場合にも、SOBIRCH により電流経路を観察できた。図 5.6 の実験結果において、封止樹脂の厚さが $50\ \mu\text{m}$ の試料において最も大きな信号強度が得られた。また、封止樹脂の厚さが $320\ \mu\text{m}$ の場合の信号は封止樹脂の厚さが $0\ \mu\text{m}$ の場合よりも強かった。この実験結果は、第 4 章で得られた知見だけでは説明できない。

第 4 章では、封止樹脂中の充填剤が散乱体として働き、観察対象に到達する超音波のパワーが減衰されることが示された。この事実から、観察対象が厚い封止樹脂に覆われているほど、弱い信号強度を示すことが容易に予想できる。この予想においては、封止樹脂の厚さが $0\ \mu\text{m}$ の場合の信号強度が最大になり、封止樹脂の厚さに対して SOBIRCH 信号の強度が単調減少な傾向を示すはずである。

しかしながら、実験結果では予想に反し、封止樹脂の厚さが $50\ \mu\text{m}$ の場合に信号強度がいったん増加した。加えて、封止樹脂の厚さが $320\ \mu\text{m}$ の場合の方が $0\ \mu\text{m}$ の場合よりも強い信号を示した。

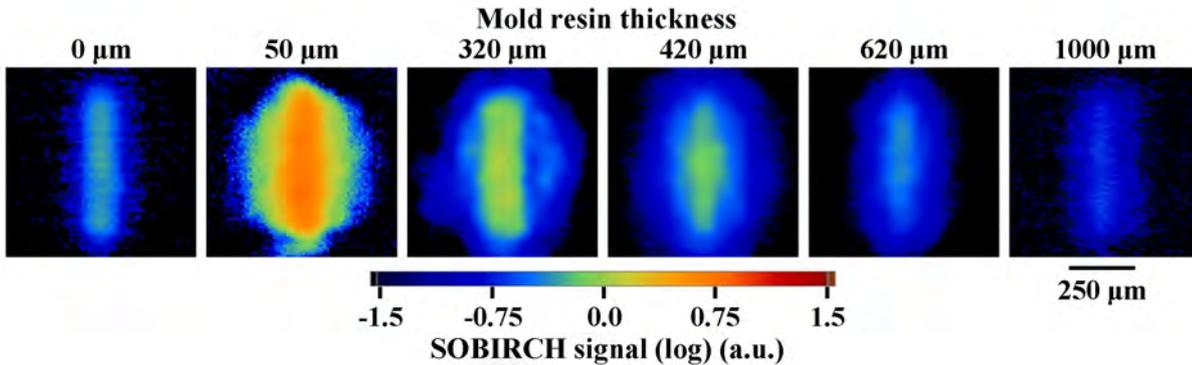


図 5.6: 厚さの異なる封止樹脂を介して測定した SOBIRCH 像。

■計算結果との比較

以上の封止樹脂の厚さに関する予想と反した実験事実に対し、第 4 章で導入した SOBIRCH の信号強度の数値計算と比較しつつ考察を行う。

図 5.7 には、封止樹脂の厚さと SOBIRCH の信号強度の関係を示している。図 5.7 の横軸は封止樹脂の厚さ、縦軸は信号強度を示している。図 5.7 中のプロットは実験結果、破線は第 4 章で示した充填剤の減衰の影響を考慮した場合の信号強度の数値解析の結果を示している。図 5.7 の実験と計算の結果は、それぞれの系列において $320\ \mu\text{m}$ のときの値が 1 となるように規格化されている。図 5.7 の計算結果においても、封止樹脂が薄い場合にピークがみられた。SOBIRCH 信号の強度の計算結果にみられたピークは次のように解釈できる。

封止樹脂が極めて薄い場合は、封止樹脂が厚いほど、樹脂での超音波の吸収量が増加する。加えて、半導体デバイスのチップ部のシリコンのような結晶性の物質に比べ、封止樹脂の一般的な母材であるエポキシ樹脂の熱伝導度は極めて悪い。樹脂での超音波の吸収量の増加と熱伝導度の悪化から、極めて薄い封止樹脂では、樹脂が厚くなるほどに封止樹脂中での発熱量が増加し、SOBIRCH 信号の強度が向上する。一方で、封止樹脂が極めて厚い場合は、第 4 章の知見から予想されるように、観察対象の電流経路の近傍に到達する超音波のパワーが充填剤での散乱により著しく減衰する。極めて厚い封止樹脂では、充填剤による散乱の影響は樹脂が厚いほど強く現れ、SOBIRCH 信号の強度を低下させる。結果的に、封止樹脂の厚さの増加による発熱量の増大と、散乱による超音波の到達パワーの低下が釣り合ったとき、封止樹脂の厚さに対して SOBIRCH 信号の強度にピークが現れたものと考えられる。

以上の考察より、第 4 章から得られた知見に反し SOBIRCH 信号の強度にピークがみられた要因を説明できる。この考察より、封止樹脂における発熱が SOBIRCH の信号強度に支配的な影響を及ぼしていることが示唆された。しかしながら、図 5.7 において、その他の点では実験と計算の結果の傾向がよく一致しているにもかかわらず、封止樹脂の厚さが $50 \mu\text{m}$ の場合にのみ実験結果と計算結果の間に大きな差がある。この実験と計算の間の明確な差は、薄い封止樹脂の内部で生じている超音波の多重反射が関係していると予想される。

図 5.7 の計算では、超音波振動子が出射した進行波が形成する音響場のみを考慮しており、多重反射の影響は無視していた。封止樹脂が厚い場合には、散乱減衰の効果により多重反射の影響は無視できるほど小さくなっていると考えられる。封止樹脂が極めて薄い場合には散乱減衰の効果が弱くなり、多重反射の影響が無視できないほどに大きいことが考えられる。次節では、多重反射の影響を考慮した数値計算モデルを構築し、SOBIRCH 信号の強度と封止樹脂の厚さの関係についてより詳細に議論する。

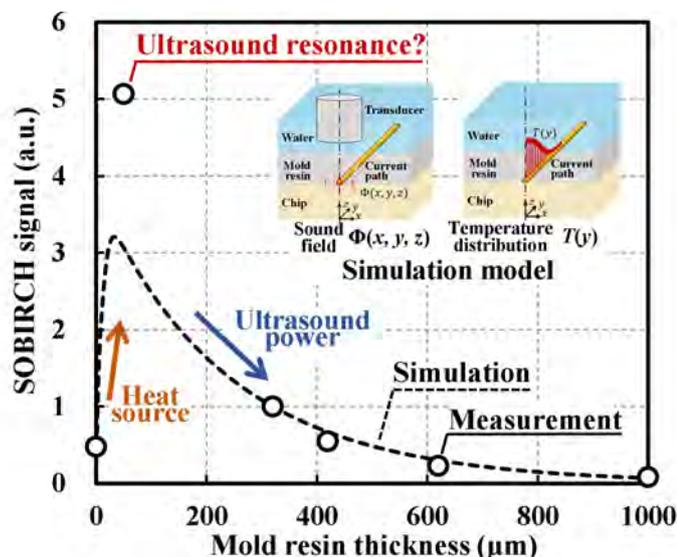


図 5.7: SOBIRCH 信号の強度と封止樹脂の厚さの関係。

5.3.4 本節のまとめ

本節では、商用の封止樹脂の厚さの範囲においても SOBIRCH により電流経路の観察が可能か、実験的に検証した。第 4 章と同様の基本的な配線構造を模した試料を商用の厚さの範囲の樹脂で封止し、SOBIRCH による測定を実施した。

封止樹脂の厚さが 1000 μm の場合でも、信号強度は著しく低下するが、SOBIRCH により電流経路を観察できた。また、異なる厚さの封止樹脂を介した測定と数値計算の比較より、封止樹脂における発熱が SOBIRCH の信号に対して支配的な影響を及ぼしている事が示唆された。

封止樹脂の厚さが極めて薄い場合には、SOBIRCH の信号強度に対する実験と計算の間に顕著な差が生じた。これは、計算モデルにおいて、封止樹脂が薄い場合の超音波の多重反射を考慮できていないことが原因であると予想できる。次節では、超音波の多重反射を計算モデルに取り入れ、封止樹脂が薄い場合に生じた実験と計算の間の誤差に関し、より詳細な議論を行う。

5.4 封止樹脂での超音波の共振と最適な測定条件

5.4.1 本節の目的と内容

前節において、封止樹脂が 50 μm と薄い場合において、実験結果と計算結果において大きな差が見られた。これは、封止樹脂が薄い場合には内部での超音波の共振の影響が顕著に現れたためと考えられる。加えて、超音波の共振が SOBIRCH の信号強度に顕著な影響を及ぼしていた場合、超音波の周波数を適切に選択すればより高い信号強度で電流経路を観察可能なことが予想される。

本節では、封止樹脂の内部で生じる超音波の共振の影響について検討し、超音波の周波数の適切な選択による SOBIRCH 信号の強度の向上についても検討した。

5.4.2 封止樹脂の厚さと超音波の多重反射の関係

5.4.2.1 平面波の垂直入射を仮定したときの超音波の多重反射

■計算モデルの定義

多重反射の影響を考察するために、図 5.8 に示す Water, Resin, Si の三層構造に対して樹脂内部での減衰を考慮した場合の Si 層への透過音圧 $P_t(L)$ と Resin 層内の音圧分布 $P(L, z)$ の定式化を試みる。定式化にあたり、音波の伝搬を平面波と仮定し、図 5.8 中の Water - Resin 界面及び Resin - Si 界面へは平面波が P_i として垂直に入射するものとする。図 5.8 中の Water と Si は Resin と接する界面をもつ半無限媒質であるとし、Resin の層の厚さを L とする。図 5.8 中の Z_w, Z_r, Z_s はそれぞれ Water, Resin および Si の層の音響インピーダンスを示している。 $t_{a,b}$ は媒質 a から媒質 b へ平面波が入射する際の界面の音圧透過率を示しており、 $r_{a,b}$ は媒質 a から媒質 b へ平面波が入射する際の界面の音圧反射率を示している。こ

ここで $t_{a,b}$ と $r_{a,b}$ は媒質 a と媒質 b の音響インピーダンス Z_a , Z_b より次のように表される.

$$r_{a,b} = \frac{Z_b - Z_a}{Z_b + Z_a} \quad (5.2)$$

$$t_{a,b} = \frac{2Z_b}{Z_b + Z_a} \quad (5.3)$$

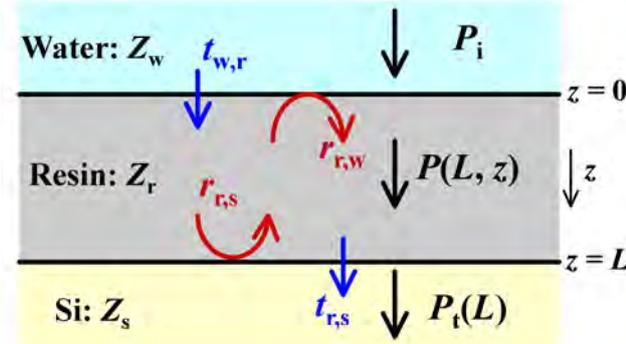


図 5.8: 封止樹脂での超音波の伝搬を平面波の垂直入射と仮定した場合の多重反射のモデル.

■電流経路に到達する超音波の周波数特性

ここでは多重反射及び樹脂内での減衰を考慮した場合の図 5.8 の Si 層への音圧透過率を検討する. Resin 層内の波数と減衰係数を k_r と α_r とすれば, Water 層から Si 層へ直達する音波の音圧 P_0 は

$$\begin{aligned} P_0 &= t_{w,r} t_{r,s} P_i \exp(-\alpha_r L) \exp(-ik_r L) \\ &= t_{w,r} t_{r,s} P_i \exp(-i\gamma_r L) \\ (\gamma_r &= k_r + i\alpha_r) \end{aligned} \quad (5.4)$$

と書ける. ここで, γ_r は Resin 層の複素波数である. また Resin 層内を一往復後と二往復後に Si 層へ到達する音波の音圧 P_1 , P_2 は

$$\begin{aligned} P_1 &= t_{w,r} r_{r,s} r_{r,w} t_{r,s} P_i \exp(-i\gamma_r L - i\gamma_r 2L) \\ &= t_{w,r} t_{r,s} P_i \exp(-i\gamma_r L) \cdot r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L) \\ &= P_0 \cdot r_{r,s} r_{r,w} \exp(-2i\gamma_r L), \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} P_2 &= t_{w,r} r_{r,s} r_{r,w} r_{r,w} r_{r,s} t_{r,s} P_i \exp(-i\gamma_r L - ik_r 4L) \\ &= t_{w,r} t_{r,s} P_i \exp(-i\gamma_r L) \cdot r_{r,s}^2 r_{r,w}^2 \exp(-i\gamma_r 2L)^2 \\ &= P_0 \cdot \{r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L)\}^2. \end{aligned} \quad (5.6)$$

つまり, Resin 層内を n 回往復する透過波 P_n は式 (5.7) のようになる.

$$P_n = P_0 \cdot \{r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L)\}^n. \quad (5.7)$$

ここで、 $P_t(L)$ は多重反射した透過波 P_n すべて足し合わせると求めることができるので

$$\begin{aligned} P_t(L) &= P_0 + P_1 + P_2 + \cdots + P_n + \cdots = \sum_{m=0}^{\infty} P_m \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} P_0 \cdot \{r_{r,s}r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L)\}^m \\ &= P_0 \sum_{m=0}^{\infty} \{r_{r,s}r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L)\}^m \end{aligned} \quad (5.8)$$

と級数でまとめられる。式 (5.8) は式 (5.9) のような

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + \cdots = \sum_{n=0}^{\infty} x^n \quad (-1 < x < 1) \quad (5.9)$$

の形の分数関数のマクローリン展開を用いると $-1 < r_{r,s}r_{r,w} < 1$ のとき、

$$P_t(L) = \frac{P_0}{1 - r_{r,s}r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L)} = \frac{t_{w,r}t_{r,s}P_i \exp(-i\gamma_r L)}{1 - r_{r,s}r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L)} \quad (5.10)$$

と簡単化できるので、多重反射を考慮した見かけの透過係数 $t_{ap}(L)$ は式 (5.11) のようになる。

$$\therefore t_{ap}(L) = \frac{P_t(L)}{P_i} = \frac{t_{w,r}t_{r,s} \exp(-i\gamma_r L)}{1 - r_{r,s}r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L)}. \quad (5.11)$$

Si 層へ到達する音圧強度 $I_t(L)$ と Resin 層に入射する音圧強度 I_i は

$$I_t(L) = \frac{P_t^2(L)}{2Z_s}, \quad (5.12)$$

$$I_i = \frac{P_i^2}{2Z_w} \quad (5.13)$$

であるため、到達する音圧強度 $I_t(L)$ と入射する音圧強度 I_i の比は

$$\frac{I_t(L)}{I_i} = \frac{Z_w}{Z_s} \cdot \frac{P_t^2(L)}{P_i^2} = \frac{Z_w}{Z_s} \cdot t_{ap}^2(L) \quad (5.14)$$

と書き表すことができる。したがって、Si 層へ到達する音圧強度 $I_t(L)$ と Resin 層に入射する音圧強度 I_i の比は式 (5.15) のようにまとめられる。

$$\therefore \left| \frac{I_t(L)}{I_i} \right| = \frac{Z_w}{Z_s} \cdot \frac{T^2(L)}{1 + R^2(L) - 2R(L) \cos 2\phi(L)}, \quad (5.15)$$

$$(T(L) = t_{w,r}t_{r,s} \exp(-\alpha_r L), R(L) = r_{r,s}r_{r,w} \exp(-\alpha_r 2L), \phi(L) = k_r L).$$

図 5.9 に式 (5.15) の計算結果を示す。図 5.9 の横軸と縦軸は樹脂の厚さ及び $I_t(L)$ と I_i の比を示している。図 5.9 中の実線は多重反射を考慮した式 (5.15) の計算結果、破線は多重反射を無視した場合の到達する音圧強度を示している。図 5.9 より樹脂が厚い場合には樹脂内部での減衰量が大きくなり多重反射の影響が小さくなるが、封止樹脂が薄い場合には減衰が抑えられ多重反射の影響が大きくなり、Si 層へ到達する音圧強度が著しく向上していることが確認できる。

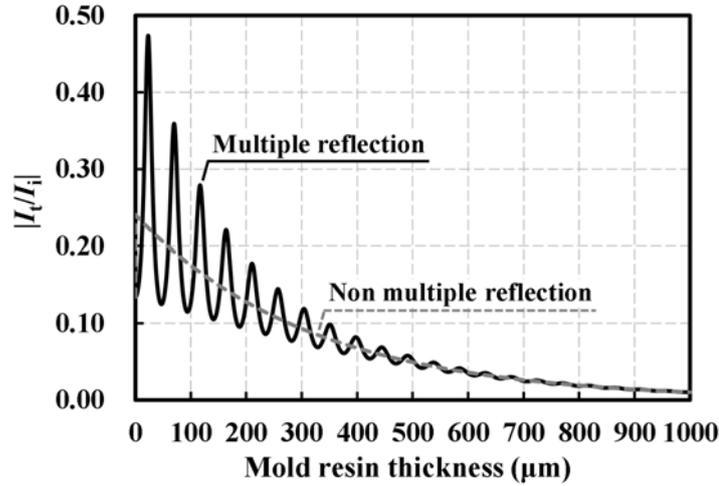


図 5.9: 多重反射を考慮したときのチップに到達する超音波の強度と封止樹脂の厚さの関係。

■多重反射を考慮したときの封止樹脂の内部音響場

ここでは多重反射を考慮した場合の樹脂内部にできる音圧の強度分布について考察する．Water 層と Resin 層の界面から距離 z 離れた点の音圧 P は多重反射を考慮し，

$$P = P_0'' + P_1' + P_1'' + P_2' + P_2'' + \dots \quad (5.16)$$

と式 (5.16) のように表わされる．ここで， P_n' は Si 層界面で反射して Water 層へと戻る後退波を表しており， P_n'' は Resin 層内で Si 層へと進む進行波を表している．図 5.6 内の厚さ L と反射係数及び透過係数を用いると

$$\begin{aligned} P_0'' &= t_{w,r} P_i \exp(-i\gamma_r z), \\ P_1' &= r_{r,s} t_{w,r} P_i \exp(-i\gamma_r (2L - z)), \\ P_1'' &= r_{r,s} r_{r,w} t_{w,r} P_i \exp(-i\gamma_r (2L + z)), \\ P_2' &= r_{r,s} r_{r,w} r_{r,s} t_{w,r} P_i \exp(-i\gamma_r 2L - i\gamma_r (2L - z)), \\ P_2'' &= r_{r,s} r_{r,w} r_{r,s} r_{r,w} t_{w,r} P_i \exp(-i\gamma_r 2L - i\gamma_r (2L + z)) \end{aligned}$$

と書き下すことができ，これをまとめると P_n'' は，

$$\begin{aligned} P_0'' &= t_{w,r} P_i \exp(-i\gamma_r z), \\ P_1'' &= r_{r,s} r_{r,w} t_{w,r} P_i \exp(-i\gamma_r (2L + z)) \\ &= t_{w,r} P_i \exp(i\gamma_r z) \cdot r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L) \\ &= P_0'' \left\{ r_{r,s} r_{r,w} \exp(i\gamma_r 2L) \right\}^1, \\ P_2'' &= r_{r,s} r_{r,w} r_{r,s} r_{r,w} t_{w,r} P_i \exp(-i\gamma_r 2L - i\gamma_r (2L + z)) \\ &= t_{w,r} P_i \exp(i\gamma_r z) \cdot r_{r,s}^2 r_{r,w}^2 \exp(-i\gamma_r 4L) \\ &= P_0'' \left\{ r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L) \right\}^2, \\ &\vdots \\ P_n'' &= P_0'' \left\{ r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L) \right\}^n \end{aligned}$$

となり、また、 P'_n は、

$$\begin{aligned}
P'_1 &= r_{r,s} t_{w,r} P_i \exp(-i\gamma_r(2L - z)), \\
P'_2 &= r_{r,s} r_{r,w} r_{r,s} t_{w,r} P_i \exp\{-i\gamma_r 2L + -i\gamma_r(2L - z)\} \\
&= r_{r,s} t_{w,r} P_i \exp(-i\gamma_r(2L - z)) \cdot \left(r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L)\right)^1 \\
&= P'_1 \left\{ r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L) \right\}^1, \\
P'_3 &= r_{r,s} r_{r,w} r_{r,s} r_{r,w} r_{r,s} t_{w,r} P_i \exp(-i\gamma_r 2L + -i\gamma_r 2L + -i\gamma_r(2L - z)) \\
&= r_{r,s} t_{w,r} P_i \exp(-i\gamma_r(2L - z)) \cdot \left\{ r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L) \right\}^2 \\
&= P'_1 \left\{ r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L) \right\}^2, \\
&\vdots \\
P'_n &= P'_1 \left\{ r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L) \right\}^{n-1}
\end{aligned}$$

とまとめることができる。式を整理すると、式 (5.16) は

$$\begin{aligned}
P(L, z) &= P''_0 + P'_1 + \cdots + P''_n + \cdots + P'_1 + P'_2 + \cdots + P'_n + \cdots \\
&= P''_0 \sum_{m_1=0}^{\infty} \left\{ r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L) \right\}^{m_1} + P'_1 \sum_{m_2=0}^{\infty} \left\{ r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L) \right\}^{m_2}
\end{aligned} \tag{5.17}$$

と式 (5.17) のように簡単化される。

式 (5.17) に式 (5.9) のマクローリン展開を適用すると

$$\begin{aligned}
P(L, z) &= \frac{P''_0}{1 - r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L)} + \frac{P'_1}{1 - r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L)} \\
&= \frac{t_{w,r} P_i \exp(-i\gamma_r z)}{1 - r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L)} + \frac{r_{r,s} t_{w,r} P_i \exp(-i\gamma_r(2L - z))}{1 - r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L)} \\
&= t_{w,r} P_i \cdot \frac{r_{r,s} \exp(-i\gamma_r(2L - z)) + \exp(-i\gamma_r z)}{1 - r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L)}
\end{aligned}$$

とまとめることができる。したがって、封止樹脂内の規格化音圧分布 $A_r(L, z)$ は式 (5.18) のように表される。

$$\therefore A_r(L, z) = \frac{P(L, z)}{P_i} = t_{w,r} \cdot \frac{1 + r_{r,s} \exp(-i\gamma_r 2(L - z))}{1 - r_{r,s} r_{r,w} \exp(-i\gamma_r 2L)} \cdot \exp(-i\gamma_r z). \tag{5.18}$$

Resin 層内部の音圧強度分布 $I(L, z)$ と Resin 層に入射する音圧強度 I_i は

$$I_t(L) = \frac{P^2(L, z)}{2Z_r}, \tag{5.19}$$

$$I_i = \frac{P_i^2}{2Z_w} \tag{5.20}$$

であるため、音圧強度分布 $I(L, z)$ と入射する音圧強度 I_i の比は

$$\frac{I(L, z)}{I_i} = \frac{Z_w}{Z_r} \cdot \frac{P^2(L, z)}{P_i^2} = \frac{Z_w}{Z_r} \cdot A_r^2(L, z) \tag{5.21}$$

と表現できる。したがって、音圧強度分布 $I(L, z)$ と入射する音圧強度 I_i の比は式 (5.22) のようにまとめられる。

$$\therefore \left| \frac{I(L, z)}{I_i} \right| = \frac{Z_w}{Z_r} \cdot T'^2(z) \frac{1 + R'^2(L, z) + 2R'(L, z) \cos 2\phi'(L, z)}{1 + R^2(L) - 2R(L) \cos 2\phi(L)}, \quad (5.22)$$

$$\left(\begin{array}{l} T'(z) = t_{w,r} \exp(-\alpha_r z), R(L) = r_{r,s} r_{r,w} \exp(-\alpha_r 2L), \\ R'(L, z) = r_{r,s} \exp(-\alpha_r 2(L - z)), \phi(L) = k_r L, \phi'(L, z) = k_r (L - z) \end{array} \right).$$

図 5.10 に式 (5.22) の計算結果を示す図 5.10 に式 (5.22) の横軸は樹脂の厚さで規格化した Water - Resin 界面からの距離を示しており、縦軸は超音波の強度を示している。封止樹脂の厚さ L が超音波の波長 λ の 4 分の 1 の奇数倍のときに樹脂内部で共振が起きることが予想された。この計算結果を用いて、温度分布の数値解析の熱源を定義し直し、SOBIRCH の信号強度を再度計算した。

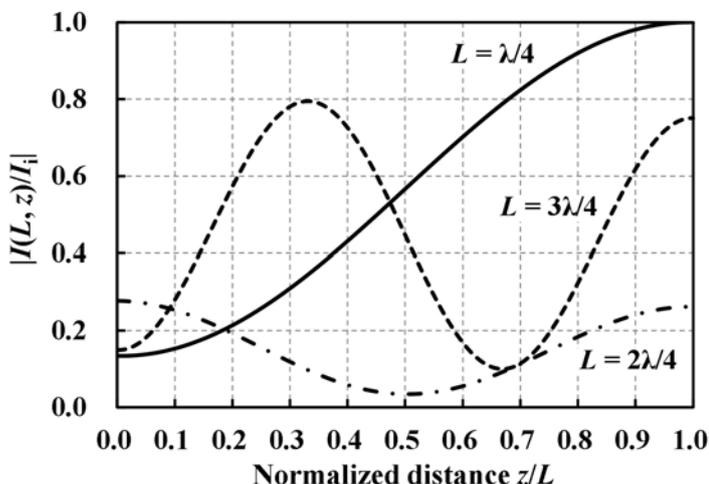


図 5.10: 多重反射を考慮したときの封止樹脂の内部に生じる超音波の強度分布。

5.4.2.2 前節の実験結果との比較

図 5.11 に、封止樹脂の内部に生じる超音波の多重反射も考慮した SOBIRCH の信号強度の計算結果を示す。計算では、超音波の周波数は 40 MHz で一定とした。図 5.11 の横軸は封止樹脂の厚さ、縦軸は SOBIRCH の信号強度を示している。図 5.11 の実線は多重反射を考慮した際の SOBIRCH の信号強度の計算結果である。図 5.11 のプロットと破線は、比較のため、図 5.7 の測定と計算の結果を再掲している。図 5.11 中のプロットで示されている測定結果は、封止樹脂の厚さが $320 \mu\text{m}$ のときに 1 となるように規格化されている。図 5.11 中の二つの計算結果は、多重反射を無視した際の破線の系列において、封止樹脂の厚さが $320 \mu\text{m}$ のときに 1 となるように規格化されている。

図 5.11 において、実線で示されている超音波の多重反射を考慮した計算結果は、封止樹脂が薄いほど厚さの変化に対し周期的に著しく変動している。多重反射を考慮した計算結果では、封止樹脂が薄い場合は、変動が最も激しいところで信号強度に 3 倍程度の変化がみられる。一方で、封止樹脂が厚い場合の信号強度の変動幅は、多重反射の影響を近似的に無視しても差し支えないほど小さくなっている。前節で問題となった、封止樹脂の厚さが $50 \mu\text{m}$ のときのプロットと破線の間大きな差は、多重反射を考慮した計算結果においてうまく説明されていることも読み取れる。

以上より、封止樹脂が薄い場合には多重反射の影響で樹脂内部に超音波の共振が生じるため、封止樹脂の厚さを適切に選択することで SOBIRCH の信号強度を向上可能なことが示唆された。しかし、樹脂の厚さを所望の値まで厳密に制御するのは容易ではない。一方で、超音波の共振は樹脂の厚さと波長の関係で決まるため、超音波の周波数の調整によっても共振を利用することが可能と期待できる。次の実験では、超音波の周波数の適切な調整による SOBIRCH の信号強度向上の可能性について議論する。

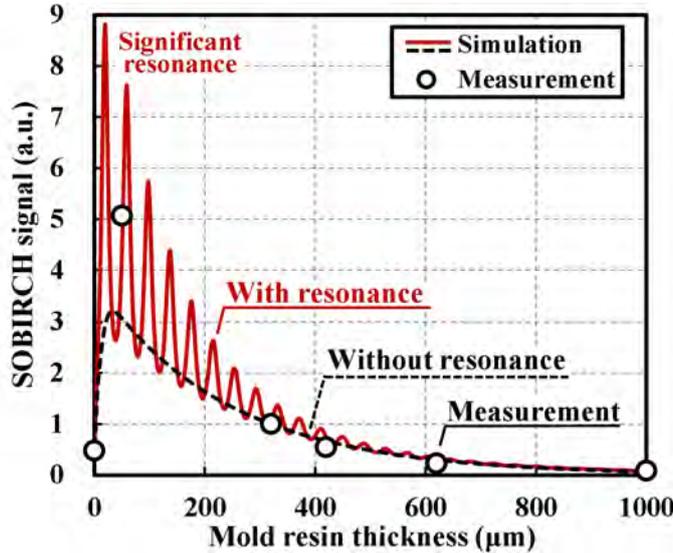


図 5.11: 超音波の多重反射を考慮したときの SOBIRCH 信号の強度と封止樹脂の厚さの関係。

5.4.3 封止樹脂での超音波の共振を利用した信号強度の向上

5.4.3.1 超音波の周波数の適切な選択による信号強度向上の可能性

実験と計算の比較による図 5.11 での議論から、薄い封止樹脂の内部では超音波の共振が生じ、SOBIRCH の信号強度に顕著な影響を及ぼすことが示唆された。

封止樹脂での超音波の共振は、平面波の垂直入射を仮定した場合、図 5.10 での考察より、封止樹脂の厚さ L 、音速 c 、超音波の周波数 f が式 (5.23) の条件を満足するときに生じる。

$$\frac{L}{c}f = \frac{2n-1}{4}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (5.23)$$

封止樹脂の厚さと音速を一定とした場合、式 (5.22) と式 (5.23) より、SOBIRCH 信号の強度は共振周波数で極大値を取るような顕著な周波数特性を示すことが予想される。

超音波の共振を利用して信号強度を向上するために封止樹脂の厚さを厳密に調整することは、一般的に、困難と考えられる。一方で、超音波の周波数の調整は、厚さの調整に比べ比較的容易に行える。式 (5.23) より、封止樹脂の厚さに対して超音波の周波数を適切に選択することで、厚さの調整に比べより簡便に信号強度を向上可能なことが予想できる。

ここでは、薄い封止樹脂の内部で生じる超音波の共振の影響について実験と計算の両面から検証し、超音波の周波数の適切な選択による SOBIRCH の信号強度向上の可能性について議論する。

5.4.3.2 実験結果と考察

■ 試料と測定条件

超音波の周波数を変化させて、SOBIRCH の信号強度を測定した。図 5.5 の封止樹脂の厚さが 0 μm と 320 μm の試料において、線幅 2 μm の配線を観察対象とし、表 5.6 の振動子を使用して測定を実施した。

■ 実験結果と計算結果の比較

図 5.12 に超音波の周波数を変化させたときの SOBIRCH の信号強度の測定結果を示す。本測定では周波数が 46 MHz のときに最も強い信号を得ることができた。図 5.13 に測定結果の配線上の信号強度を示す。図 5.13 の横軸は照射した超音波の周波数、縦軸は信号強度を示している。図 5.13 中の白丸は測定結果、実線は前節で考察した多重反射を考慮した場合の信号強度の計算結果を示している。

図 5.13 より、測定結果と数値解析の結果の傾向がおおよそ一致したことから、封止樹脂が薄い場合には多重反射の影響を考慮して超音波の周波数を調整することで、信号強度を向上可能なことが示された。

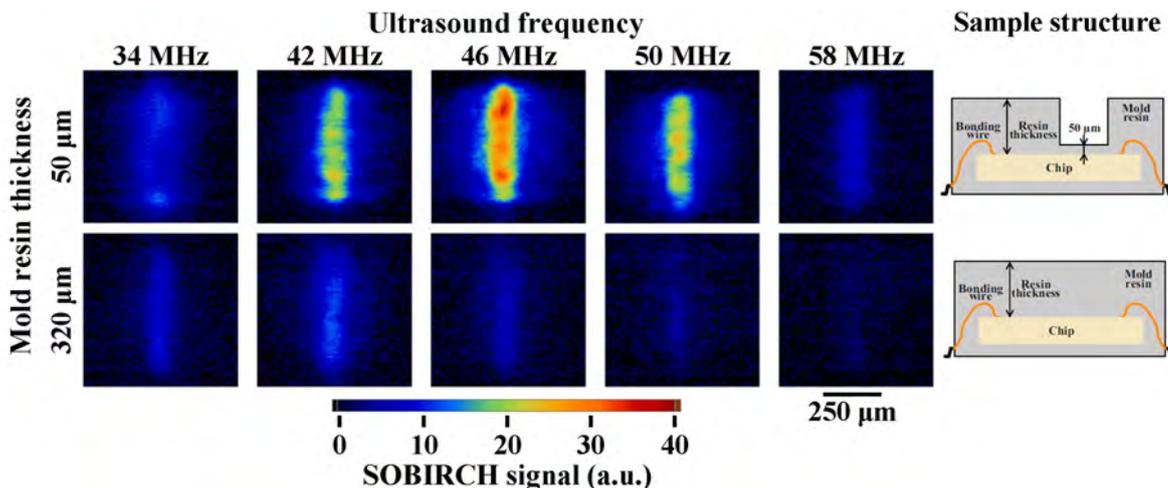


図 5.12: 超音波の周波数を変化させて測定したときの SOBIRCH 像。

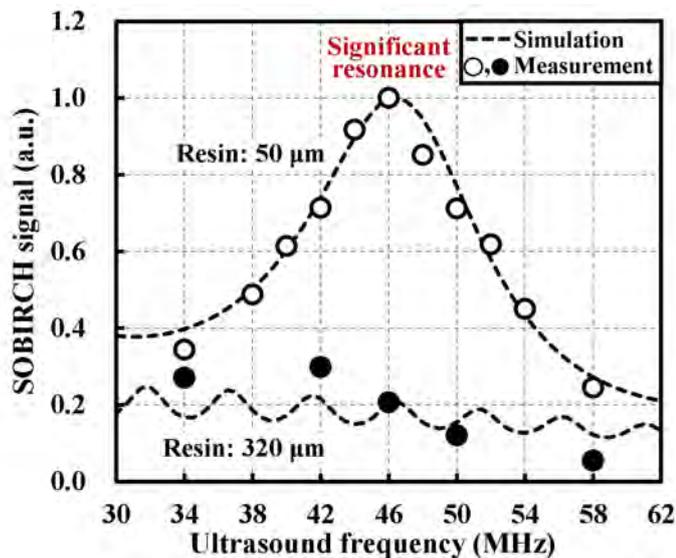


図 5.13: SOBIRCH 信号の強度と超音波の周波数の関係。

5.4.4 本節のまとめ

本節では、封止樹脂の内部で生じる超音波の共振の影響と、超音波の周波数の適切な選択による SOBIRCH の信号強度の向上について、実験と計算の双方から検証した。超音波の共振を考慮した場合、SOBIRCH の信号強度の測定結果と計算結果がよく一致した。

以上の結果より、封止樹脂が波長に対して薄い場合には共振の影響が顕著に合わられ、超音波の周波数を適切に選択することで信号強度を著しく向上可能なことが示された。

5.5 反射波の周波数成分に基づいた共振周波数の推定

5.5.1 本節の目的と内容

本節では、SOBIRCH による電流経路の観察に最適な超音波の周波数の推定方法について検討する。

前節では、封止樹脂の内部に生じる超音波の共振を利用することで、SOBIRCH の信号強度を向上可能なことが示された。しかし、前節の議論だけでは、SOBIRCH 信号の周波数特性を計測するまでは超音波の共振周波数を確認できない。SOBIRCH の利便性を向上させるには、SOBIRCH による電流経路の観察の前に共振周波数を推定しておく必要がある。

封止樹脂での共振は超音波の多重反射に起因しているため、試料へパルス状の超音波を照射し、反射波の周波数成分を観察することで共振周波数の推定が可能と予想される。本節では、フーリエ変換を利用した信号処理により、反射波の周波数伝達関数から SOBIRCH の測定に最適な超音波の周波数を推定可能か議論する。

5.5.2 共振周波数の推定方法

図 5.14 に、試料からの反射波を利用した共振周波数の推定方法の概要について示している。共振周波数の推定には、反射波の周波数伝達関数を利用する。周波数伝達関数は、観察対象からの反射波 (標的波) と参照物からの反射波 (参照波) をそれぞれフーリエ変換し、パルス状の超音波が元来有する周波数成分を除去するために、標的波の周波数成分を参照波の周波数成分で除算して算出する。

半導体デバイスの封止樹脂の内部では、周波数に応じて共振と反共振が生じると予想される。共振が生じる周波数においては、チップ上の電流経路に到達する超音波の強度が向上するため、正味の封止樹脂を透過する超音波の強度が向上し、封止樹脂を反射する超音波の強度が低下する。一方で、反共振が生じる周波数では、正味の封止樹脂から反射してくる超音波の強度が向上し、封止樹脂を透過する超音波の強度が低下する。したがって、反射波の周波数伝達関数では、SOBIRCH の信号強度が向上する共振周波数の近傍には下に凸な傾向が確認できると予想される。

以上の仮説に基づき、本節では、図 5.14 の方法論を用いて、反射波の周波数成分より共振周波数の推定を行った。

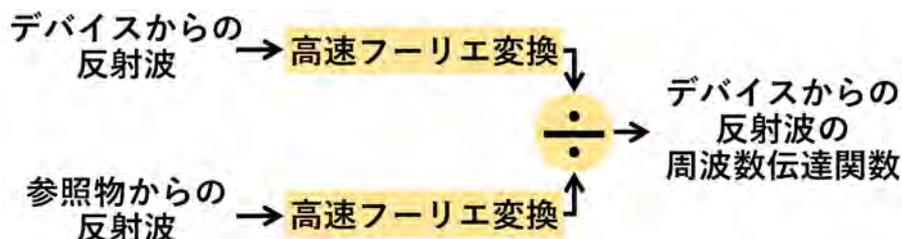


図 5.14: 反射波の周波数成分に基づいた共振周波数の推定方法.

5.5.3 実験結果と考察

5.5.3.1 測定試料と測定条件

測定には、前節で SOBIRCH 信号に顕著な周波数特性がみられた、封止樹脂の厚さが $50\ \mu\text{m}$ の試料を使用し、超音波顕微鏡を使用して反射波を取得した。参照物質には、内部での多重反射を無視できる程度に十分に厚い、厚さが $3\ \text{mm}$ 程度のアリミニウム板を用いた。振動子は表 5.6 と同じものを使用した。

5.5.3.2 試料からの反射波

図 5.15 に、反射波の時間波形を示す。図 5.15 の赤線は標的波形としての試料からの反射波、黒線は参照波形としての参照物質からの反射波を示している。図 5.15 では、波形の形状の比較のため、それぞれの時間波形の絶対値の最大値が 1 となるように規格化して表示している。赤線の標的波形には、多重反射の影響で微小な成分が確認できる。

図 5.15 の時間波形に対して図 5.14 の方法論を適用し、周波数伝達関数より共振周波数を推定する。

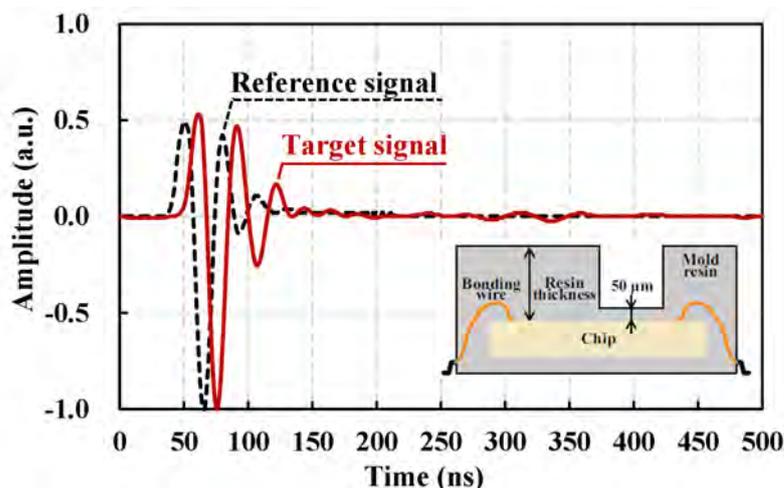


図 5.15: 試料からの反射波の時間波形.

5.5.3.3 信号強度の周波数特性と周波数伝達関数の対比

図 5.16 に、反射波の周波数特性を示す。図 5.16 の横軸は超音波の周波数、縦軸は信号強度を示している。図 5.16 の実線は、測定した反射波に図 5.14 の方法論を適用して算出した周波数伝達関数を示している。図 5.16 のプロットと破線は、図 5.13 の SOBIRCH 信号の実験結果と計算結果の周波数特性を比較の

ために再掲している。

図 5.16 において実線の周波数伝達関数は、SOBIRCH 信号の強度が最大値を示した 46 MHz で下に凸な傾向を示した。この結果より、封止樹脂が波長に対して薄い場合には、試料からの反射波から算出した周波数伝達関数より SOBIRCH 信号の強度が向上する共振周波数を推定可能なことが示された。

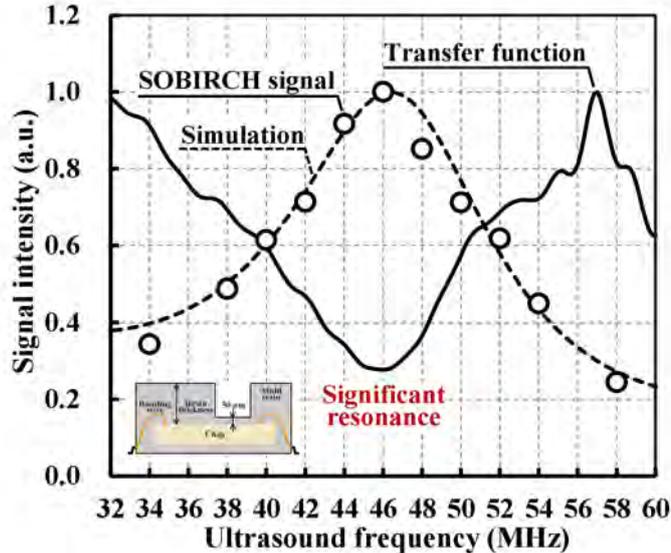


図 5.16: 反射波から推定した周波数伝達関数と SOBIRCH 信号の周波数特性。

5.5.4 本節のまとめ

本節では、SOBIRCH による電流経路の観察に最適な超音波の周波数の推定方法について議論した。反射波の周波数伝達関数より、SOBIRCH の測定に最適な超音波の周波数を推定可能なことが示された。

5.6 商用のデバイスでの超音波の共振を利用した故障箇所絞込み

5.6.1 本節の目的と内容

本節では、ここまで議論した、超音波の共振を考慮した SOBIRCH の最適条件による電流経路の観察を商用の半導体デバイスの故障箇所絞込みに適用する。

第 5.3 節と第 5.4 節の議論より、薄い封止樹脂の内部には超音波の共振が生じるため、超音波の周波数の適切な選択により SOBIRCH の信号強度を向上可能なことが示された。第 5.5 節の議論より、超音波の共振周波数は試料からの反射波の周波数伝達関数より推定可能なことも示された。

本節の議論では、商用のデバイスでも超音波の伝搬に基づいた SOBIRCH の最適条件が反射波から推定でき、かつ、高い信号強度で故障を観察可能か実験的に検証した。検証のため、商用のマイクロコントローラの電源部に電氣的オーバーストレス (EOS: Electrical Over Stress) 破壊により故障を作り込んだ試料を用意した。

5.6.2 試料の構成

図 5.17 に、EOS 破壊により電源部に故障を作り込んだマイクロコントローラに対する SOBIRCH を用いた故障箇所の絞込み結果を示す。この試料の封止樹脂は $600\ \mu\text{m}$ 程度である。SOBIRCH を用いて、厚さが $600\ \mu\text{m}$ 程度の封止樹脂を介しても故障箇所を観察できている。前節までの結果より、封止樹脂の厚さが $600\ \mu\text{m}$ 程度の場合では、樹脂中での超音波の散乱の影響が強くなり、共振を利用した信号強度の向上は期待できない。図 5.17 で SOBIRCH により故障箇所が絞込まれた試料の封止樹脂を $200\ \mu\text{m}$ 程度までレーザーで薄くし、半導体デバイスの故障箇所絞込みでの超音波の共振の影響を検証した。

図 5.18 に、封止樹脂を薄くした試料の概要を示す。図 5.18(a) に、封止樹脂を薄くした後での試料の超音波反射像を示す。図 5.18(b) に、試料の外観の構造を模式的に示す。故障が作り込まれた電源部の近傍をレーザー研磨により、厚さを $200\ \mu\text{m}$ 程度に薄くした。図 5.18(a) 中の青い破線で囲まれた灰色の領域が電源部近傍の被研磨部である。この試料に対し、超音波の共振を利用した故障箇所の絞込みを適用した。

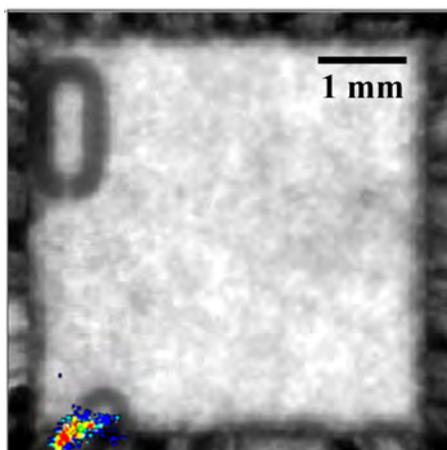
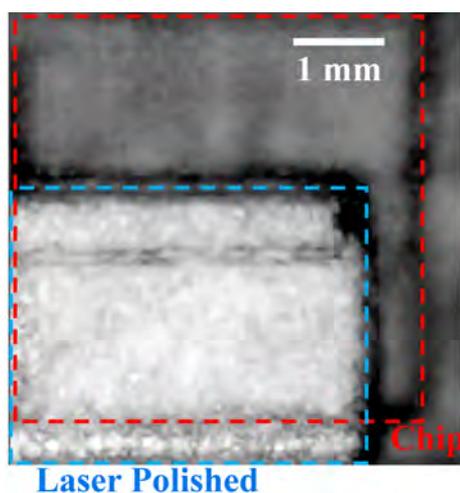
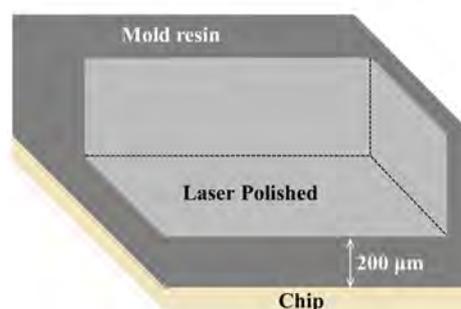


図 5.17: EOS 破壊を起こさせた半導体デバイスでの SOBIRCH による故障箇所の絞込み。



(a) 超音波反射像。



(b) 試料の構造。

図 5.18: レーザ研磨により封止樹脂を薄化した半導体デバイスの外観と構造の模式図。

5.6.3 実験結果と考察

5.6.3.1 試料からの反射波と共振周波数の推定

図 5.19 に、電源部近傍からの反射波を用いた共振周波数の推定結果を示す。図 5.19(a) は、反射波の時間波形を示している。図 5.19(a) の赤線は、標的波形としての、試料からの反射波である。図 5.19(a) の黒線は、参照波形としての、内部での多重反射が無視できる十分な厚さをもった、厚さ 3 mm 程度のアルミニウム板からの反射波である。図 5.19(b) は、標的波と参照波をフーリエ変換した後、周波数領域で標的波の周波数成分を参照波の周波数成分で除して得られた反射波の周波数伝達関数である。図 5.19(b) の横軸は超音波の周波数、縦軸は強度を示している。

図 5.19(b) において、36 MHz 近傍に下に凸な傾向がみられた。36 MHz が共振周波数と予想される。共振周波数と予想された 36 MHz の近傍に超音波の周波数を設定し、SOBIRCH による電流経路の観察を実施した。

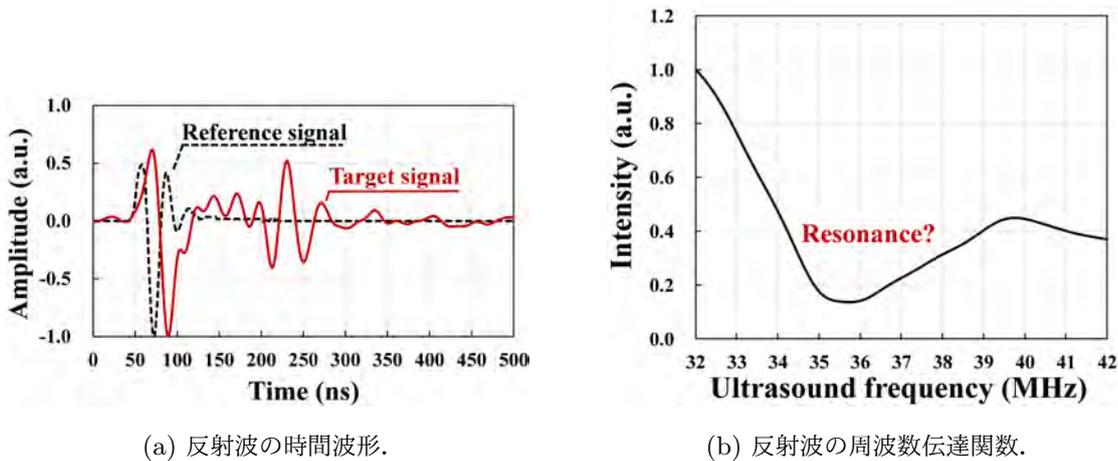


図 5.19: 商用の半導体デバイスに対する反射波の周波数成分に基づいた共振周波数の推定。

5.6.3.2 故障箇所の絞込み

■超音波反射像との重ね合わせによる故障箇所の絞込み

図 5.20 に、反射波より推定された共振周波数の近傍での SOBIRCH による故障箇所絞込みの結果を示す。図 5.20(a) には、反射像と SOBIRCH 像を重ね合わせたものを示している。図 5.20(b) は、故障とみられる箇所について拡大表示し、その詳細を記述している。図 5.20(c) には、異なる超音波の周波数を設定して SOBIRCH により取得した電流経路像を示している。

図 5.20(a) の左下に故障箇所とみられる信号が得られた。図 5.20(b) で赤色に表示された領域は強い信号が得られた箇所、ここはボンディングワイヤに相当するものと考えられる。図 5.20(b) で緑色に表示された領域の信号強度はボンディングワイヤよりも比較的弱い、チップの縁に沿った電流経路とみられるため、故障箇所と考えられる。図 5.20(c) のカラーバーは規格化された SOBIRCH 信号の強度を示している。図 5.20(c) では、故障箇所の信号強度の変化が観察しやすいよう、ボンディングワイヤの部分の信号強

度はあえてカラーバーの範囲を飽和させて表示している。理由は、ボンディングワイヤの部分の信号強度が故障箇所 비해圧倒的に大きかったためである。

反射波より推定された共振周波数は 36 MHz であり、故障箇所が最も明瞭に観察された超音波の周波数は 37 MHz であった。

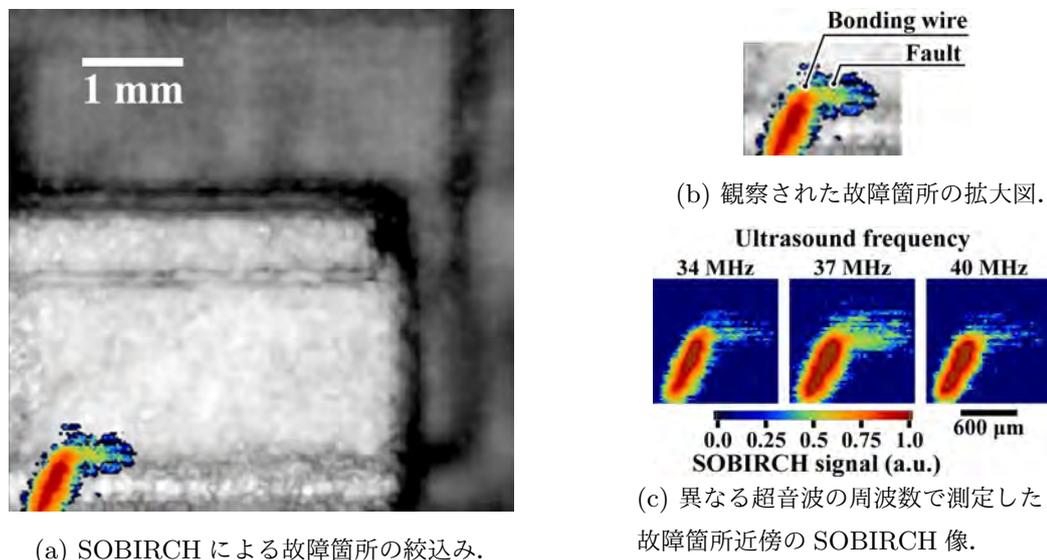


図 5.20: 半導体デバイスの故障箇所絞込みに対する推定された共振周波数の近傍での SOBIRCH の適用。

■ 共振周波数の推定結果のずれに関する考察

図 5.21 に、故障箇所の近傍での SOBIRCH 信号の周波数特性を示す。図 5.21 の横軸は超音波の周波数、縦軸は信号強度を示している。図 5.21 のプロットは故障箇所の近傍の信号強度に空間的な平均化処理を施して算出した SOBIRCH 信号の周波数特性である。図 5.21 の破線は、第 5.4 節で使用した SOBIRCH 信号の周波数特性の数値計算から得られた結果を示している。図 5.21 の実線は、図 5.19(b) の反射波の周波数伝達関数を比較のため再掲している。

図 5.21 の実験結果 (プロット) と計算結果 (破線) より、SOBIRCH 信号の強度が最大化する超音波の周波数はともに、37 MHz であることが読み取れる。一方で、反射波の周波数伝達関数では、超音波の共振周波数は 36 MHz と推定されている。SOBIRCH 信号の信号強度が最大化した超音波の周波数において、実験結果と推定結果で 1 MHz の誤差が生じている。この要因は、封止樹脂のフィラーからの超音波の後方散乱波や超音波の焦点のぼけが影響しているものと考えられる。この誤差の要因を、反射波の時間領域の伝達関数を用いて簡単に考察する。

図 5.22 に、周波数伝達関数の逆フーリエ変換により得られた、時間領域の伝達関数を示す。図 5.22 の赤線は、本節で SOBIRCH により故障箇所を観察した、図 5.18 の試料からの反射波を用いて計算した時間領域における伝達関数である。図 5.22 の黒線は、第 5.4 節で共振周波数を的確に推定できた厚さ 50 μm の封止樹脂からの反射波を用いて推定した時間領域の伝達関数である。図 5.22 の黒線は、時間領域の伝達関数の形の比較を目的として図 5.22 中に記した。厚さ 50 μm の封止樹脂では、時間領域の伝達関数に二つの信号成分がはっきりと確認できる。この二つの信号の大きい方は、水から封止樹脂へ入射した超音波の反

射波である。小さい方の信号は、封止樹脂からチップへと入射した超音波の反射波である。一方で、故障が確認された試料の厚さ $200\ \mu\text{m}$ の封止樹脂から得られた時間領域の伝達関数には、いくつかの信号成分がみられる。この余分な信号成分は、封止樹脂の音速が速かつ厚かったために、焦点がぼけてしまったことに起因していると考えられる。音波の反射体が焦点領域から外れた箇所におかれている場合、波源からの伝搬距離の差が大きくなるため波面が乱れ、反射するパルス波の形状は出射したパルス波の形状から崩れたものとなる。このパルス波の形状の崩れが、厚さ $200\ \mu\text{m}$ の封止樹脂からの反射波の周波数成分に外乱として働き、推定された共振周波数に誤差を生じさせたと考えられる。

図 5.14 で提示した共振周波数の推定方法は、反射波の周波数成分に含まれる外乱の影響が小さい場合には良好な推定結果を示す。一方で、封止樹脂が厚い場合は推定結果に誤差が生じることが確認された。封止樹脂が厚い場合の共振周波数の推定精度を向上させるには、信号処理の方法に関しより詳細な議論が必要となる。

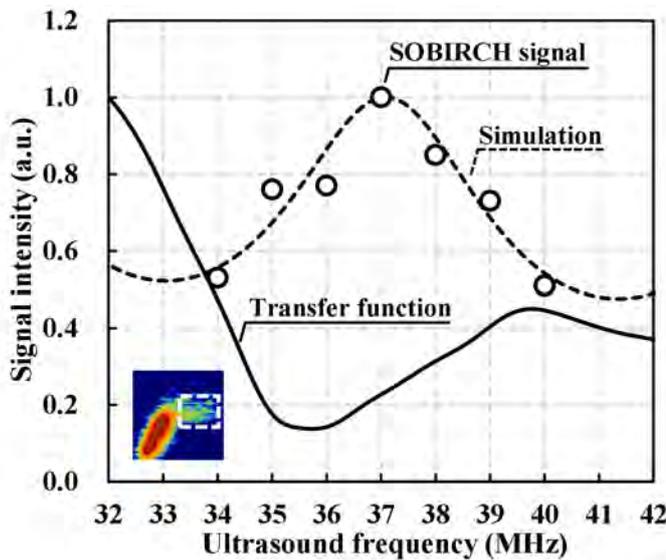


図 5.21: 故障箇所近傍における SOBIRCH 信号の周波数特性.

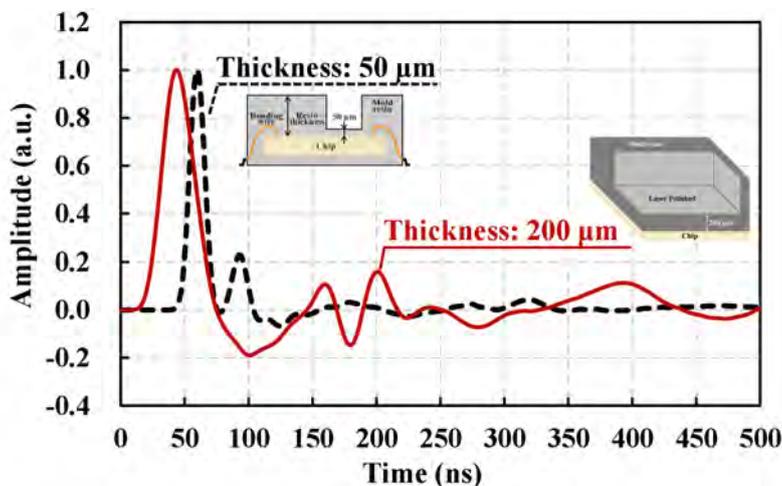


図 5.22: 封止樹脂の厚さが $50\ \mu\text{m}$ と $200\ \mu\text{m}$ の試料で反射波から算出した時間領域の伝達関数.

5.6.4 本節のまとめ

本節では、超音波の共振を考慮した SOBIRCH の測定の実験条件を、商用のデバイスの故障箇所絞込みに適用した。超音波の共振を利用することで、故障箇所もより高い信号強度で観察可能なことが確認された。測定に最適な超音波の周波数は、封止樹脂が厚い場合にはある程度の誤差を含むが、共振周波数の近傍に推定結果を得られることが示唆された。

封止樹脂が厚い場合に対して高い精度で共振周波数を推定するためには、信号処理の方法についてより詳細な議論が必要となる。しかし、本節の議論を通して、商用の半導体デバイスにおいても、超音波の共振を利用してより明瞭に故障箇所を絞込み可能なことが示され、加えて、反射波の周波数成分を利用すれば SOBIRCH の適用前に共振周波数を大まかにでも推定可能である事が示された。

5.7 商用のデバイスでの故障箇所絞込みの例

5.7.1 本節の目的と内容

本節では、故障が生じた商用の半導体デバイスでの故障箇所絞込みへの SOBIRCH の適用事例をまとめている。

第 5.7.2 節では、光加熱を利用する手法と同様な故障箇所が絞込まれた事例について報告する。観察対象には、人為的に故障を作り込んだ商用のマイクロコントローラと、実際に故障が確認されたマイクロコントローラでの検証の 2 つの試料を用意した。

第 5.7.3 節では、LIT と SOBIRCH の空間分解能の比較について報告する。半導体デバイスの構造を模した、電流経路の形状が既知な試料を用いて信号の半値幅について定量的に比較した。模擬的な試料での定量的な比較を論拠とし、商用のデバイスでの故障箇所絞込みにおける LIT と SOBIRCH の空間分解能を定性的に比較した。

5.7.2 提案手法を用いた解析事例

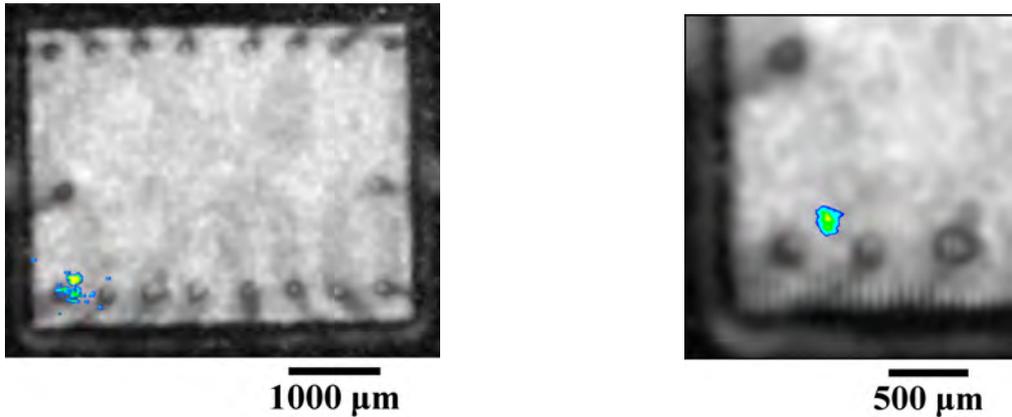
5.7.2.1 静電気破壊させた半導体デバイスでの故障箇所絞込み [134]

■封止樹脂の開封前での故障箇所の絞込み

厚さ 500 μm の封止樹脂に覆われたマイクロコントローラの I/O ピンに対して人為的に静電気 (Electro Static Discharge: ESD) 破壊を起こさせた試料に対し、SOBIRCH による故障箇所の絞込みを実施した。

図 5.23 に SOBIRCH を用いた故障箇所の絞込みの結果を示す。図 5.23 では、超音波反射像と SOBIRCH 像を重ね合わせたものを示している。図 5.23(a) は、半導体デバイスのチップの全体が収まる大きさの視野に対して SOBIRCH により故障箇所絞込みを実施した結果である。図 5.23(a) の左下の領域に SOBIRCH 信号が得られた。図 5.23(b) は、図 5.23(a) で信号が得られた箇所の周辺に観察視野を限定し、あらためて SOBIRCH による故障箇所の絞込みを実施した結果である。

図 5.23(b) より，対象となる I/O ピン付近に SOBIRCH の反応が得られており，この箇所には故障が生じていると予想される。



(a) チップ全体への SOBIRCH の適用。

(b) 故障箇所近傍への SOBIRCH の適用。

図 5.23: 静電気破壊によって生じた故障箇所に対する SOBIRCH を用いた故障箇所の絞込み。

■封止樹脂の開封後の故障箇所の絞込み

図 5.24 は，図 5.23 において SOBIRCH より故障箇所と予想された領域に対し，半導体デバイスの裏面からチップ部を露出させて OBIRCH を適用した故障箇所絞込みの結果である。OBIRCH による観察結果は，レーザ顕微鏡の結果に重ね合わせて表示している。

OBIRCH と SOBIRCH で信号が得られた箇所を更に詳細に観察すると保護ダイオードの破壊痕が確認された。以上の結果より，商用の半導体デバイスに人為的に作りこんだ ESD 破壊の痕を SOBIRCH により封止樹脂の開封前に絞込み可能なこと事例が示された。

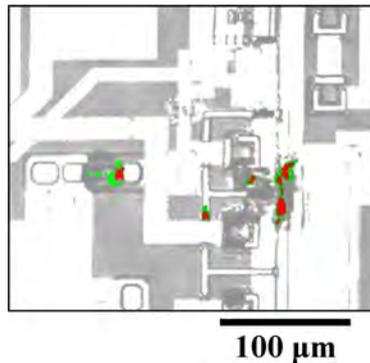


図 5.24: デバイスの裏面研磨後での OBIRCH を用いた故障箇所の絞込み。

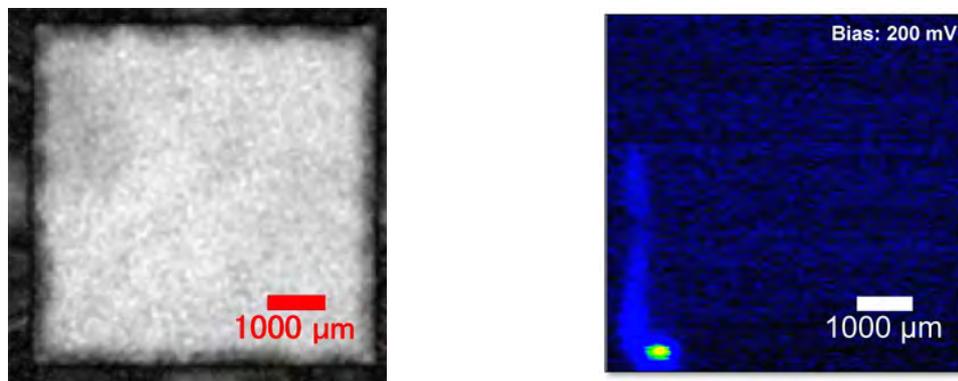
5.7.2.2 短絡故障に起因する故障箇所の絞込み [135, 136]

■封止樹脂の開封前での故障箇所の絞込み

電源と接地端子間にテスターにより短絡故障が確認されたマイクロコントローラでの故障箇所の絞込みに SOBIRCH を適用した。この試料の封止樹脂の厚さは 500 μm であった。

図 5.25 に，SOBIRCH を用いた封止樹脂の開封前での故障箇所の観察結果を示す。図 5.25(a) は，超音

波顕微鏡により取得した反射像である。この反射像の中央にある白い部分が半導体デバイスのチップ部である。反射像を用いて観察視野を決定し、SOBIRCHによる故障の観察を行った。図 5.25(b) は、SOBIRCHで取得した電流経路像である。図 5.25(b) にチップの縁に沿った電流経路が確認できる。この電流経路が当該の故障箇所と予想される。



(a) 超音波反射像.

(b) SOBIRCH 像.

図 5.25: 短絡故障が確認された試料に対する SOBIRCH を用いた電流経路の観察.

■ 封止樹脂の開封後の故障箇所の絞込み

図 5.26 に、OBIRCH による故障の観察結果を示す。SOBIRCH により図 5.25 で予想された故障箇所の直上の封止樹脂を開封し、OBIRCH を適用した。図 5.26 において、SOBIRCH と OBIRCH で同様な電流経路が確認できる。OBIRCH による電流経路の観察の後に物理解析を実施すると、チップに細かな亀裂があり、電源と接地端子間を短絡させていることが確認された。

SOBIRCH により封止樹脂の開封前に OBIRCH と同様な電流経路を観察可能な事例が示された。

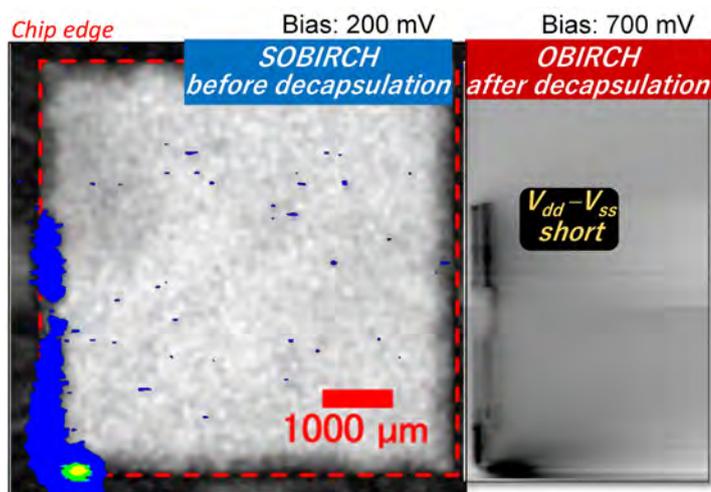


図 5.26: 故障が確認された半導体デバイスに対する SOBIRCH と OBIRCH を用いた故障箇所絞込み.

5.7.3 空間分解能についての考察

5.7.3.1 半導体デバイスの構造を模擬した試料での空間分解能の比較 [136]

■試料の構造

封止樹脂を介した電流経路の観察における LIT と SOBIRCH の空間分解能を、半導体デバイスの金属配線を模した試料を用いて実験的に比較した。図 5.27 に、使用した試料の模式図を示す。図 5.27(a) に、試料の配線パターンを示す。図 5.27(b) に試料断面の構造の模式図を示す。線幅 $2\ \mu\text{m}$ のアルミニウム配線を、異なる厚さの商用の樹脂で封止した試料を用意した。封止樹脂の厚さは、 $320\ \mu\text{m}$ 、 $420\ \mu\text{m}$ 、 $620\ \mu\text{m}$ 、 $1000\ \mu\text{m}$ とした。試料へ印加するバイアス電圧は $500\ \text{mV}$ で一定とし、測定を実施した。

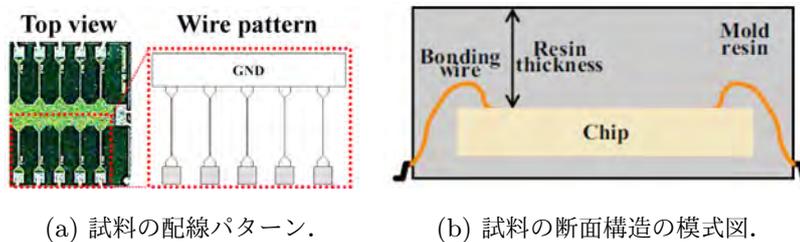


図 5.27: LIT と SOBIRCH の空間分解能の比較で使用した配線を模擬した試料の構造。

■実験結果と考察

図 5.28 に、LIT と SOBIRCH を用いた模擬試料の金属配線に対する封止樹脂を介した観察結果を示す。すべての実験結果において、SOBIRCH の方が LIT よりも、はっきりと配線の形状を観察できている。SOBIRCH では、封止樹脂の厚さが $1000\ \mu\text{m}$ の試料でも辛うじて配線の形状を視認可能な像が取得できた。LIT では、封止樹脂の厚さが $1000\ \mu\text{m}$ の場合には、配線を確認できる信号は得られなかった。

図 5.29 に、封止樹脂の厚さに対する LIT と SOBIRCH の信号の半値幅の比較を示す。封止樹脂の厚さが $1000\ \mu\text{m}$ の試料では LIT の信号が弱く信号強度の明瞭な分布が得られなかったため、LIT では半値幅の計算から除外した。SOBIRCH は、LIT より約 4 倍ほど小さな半値幅を示した。LIT の半値幅は樹脂が厚くなるほど大きくなり、樹脂が厚いほど空間分解能が低下している。一方で、SOBIRCH は樹脂の厚さに対してほぼ一定の空間分解能を示した。

SOBIRCH と LIT の信号の半値幅に見られた差異はその計測原理に起因すると考えられる。SOBIRCH は超音波加熱により誘起される電流変動を検出し、電流経路の像を得る。SOBIRCH の信号の半値幅には、超音波振動子が形成する音響場の広がりと言響場が生じさせる温度分布の広がりや支配的な影響を及ぼす。したがって、封止樹脂が厚くなるごとに検出される信号強度は低下するが、信号さえ検出できれば像の見え方に大きな違いは現れない。一方で、LIT は電流経路中で生じる発熱をサーモカメラで検出し電流経路の像を得る。生じた熱は封止樹脂の内部を放射状に伝導するため、封止樹脂が厚いほど樹脂表面に到達する際には温度分布が広がり、像も広がって見える。以上の理由より、SOBIRCH と LIT において信号の半値幅に差が生じたと考えられる。

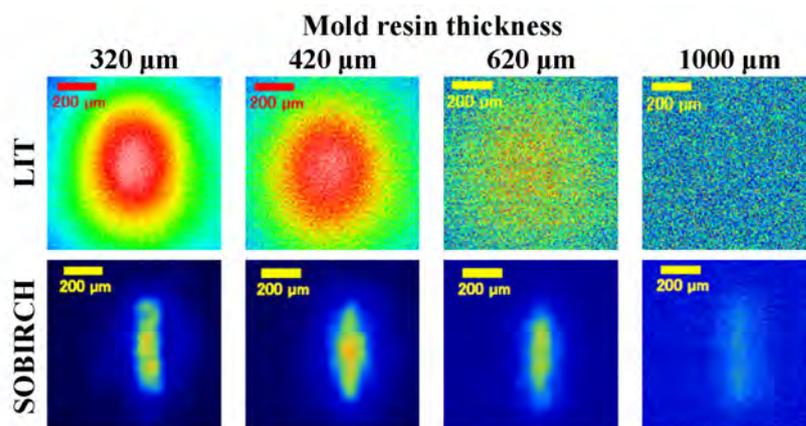


図 5.28: 電流経路の形状が既知な試料での LIT と SOBIRCH の観察結果.

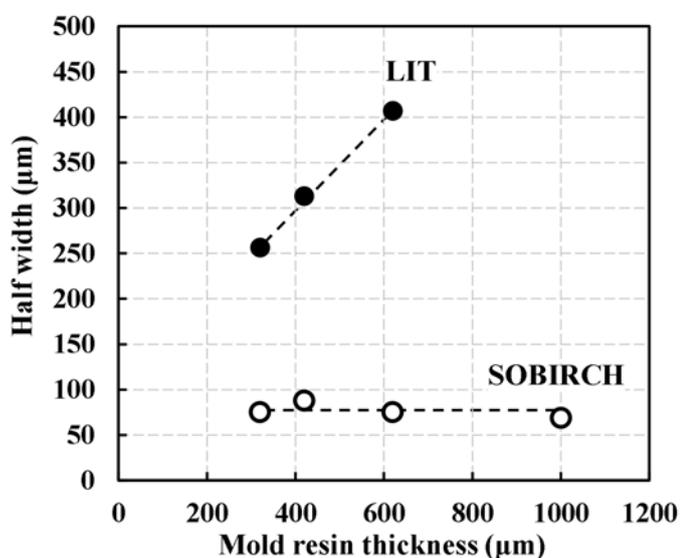


図 5.29: 封止樹脂の厚さに対する LIT と SOBIRCH の信号の半値幅.

5.7.3.2 故障箇所の絞込みにおける空間分解能の比較 [137]

■提案手法による故障箇所の絞込み

図 5.30 に、電気的オーバーストレス (EOS: Electrical Over Stress) により生じさせたマイクロコントローラの故障に対する SOBIRCH の観察結果を示す. この試料の封止樹脂の厚さは $500\ \mu\text{m}$ であった. この試料に対し, $100\ \text{mV}$ のバイアス電圧を印加して SOBIRCH を適用した.

図 5.30 に示すように, 電源部の近傍に故障箇所が観察された. この故障箇所に対し LIT と SOBIRCH を適用し, 商用のデバイスでの故障の観察において実験により空間分解能の比較を行った.

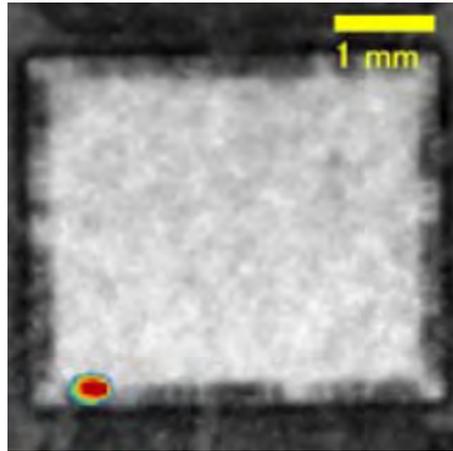
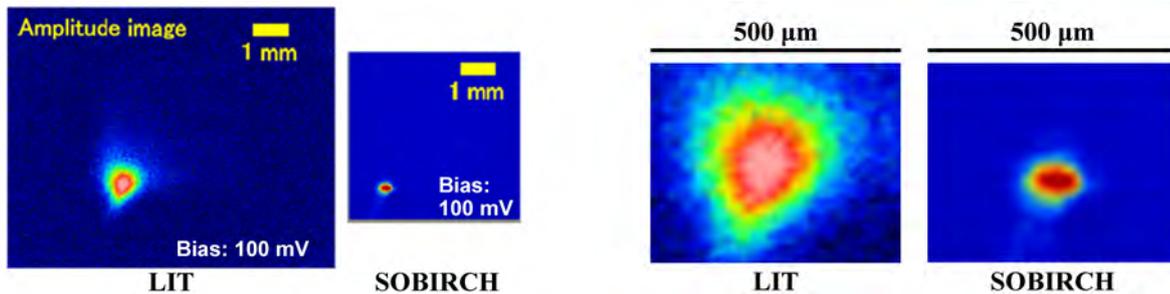


図 5.30: 電氣的オーバーストレス破壊させた試料での SOBIRCH による故障箇所の絞込み.

■発熱解析との比較

図 5.31 に、LIT と SOBIRCH で図 5.30 の故障箇所を観察した際の結果を示す．故障箇所に印加したバイアス電圧は、100 mV に設定した．図 5.31(a) は、チップ全体を観察視野に収めた時の LIT の振幅像と SOBIRCH 像を示してゐる．図 5.31(b) は図 5.31(a) の故障箇所を拡大し、画像のカラーバーを LIT と SOBIRCH で統一したものを表示している．LIT と SOBIRCH では、SOBIRCH の方がより狭い範囲に故障箇所を絞込むことが出来ている．

この結果より、SOBIRCH は、LIT よりも高い空間分解能で故障箇所を絞込める可能性が示された．



(a) 試料を包含する大きさの観察視野での比較.

(b) 信号が得られた箇所の近傍での比較.

図 5.31: LIT による故障箇所絞込みと SOBIRCH による故障箇所絞込みの比較.

5.7.4 本節のまとめ

第 5.7.2 節では、人為的に生じさせた ESD 破壊の痕に対し、SOBIRCH と OBIRCH の観察において同様の箇所が故障箇所として観察された．また、SOBIRCH と OBIRCH で、短絡故障に起因する異常な電流経路に対し、同様な観察結果が得られた．

第 5.7.3 節では、電流経路の形状が既知な模擬試料とマイクロコントローラの電源部に EOS 破壊を起こさせた試料の二つを用い、LIT と SOBIRCH の空間分解能について比較した．実験結果より、SOBIRCH は、LIT よりも高い空間分解能で故障箇所の絞込みが可能であることを示した．

5.8 本章のまとめ

本章の議論より，封止樹脂を介しても SOBIRCH により電流経路を可視化でき，かつ，SOBIRCH を用いた電流経路の観察には封止樹脂での超音波の共振に基づいた最適な測定条件があることを示した．封止樹脂の厚さに対する超音波の周波数の最適値は，反射波を用いて推定可能なことを示した．推定した最適値で SOBIRCH による故障箇所の絞込みを実施すると，より明瞭に故障を観察可能なことを明らかにした．

加えて，故障箇所絞込みにおいて，SOBIRCH を封止樹脂の開封前に適用することで OBIRCH と同様な故障を観察できる場合があることが示された．また，SOBIRCH は，LIT より高い空間分解能で故障箇所を絞込み可能なことが示された

第6章

積層構造への適用に関する基礎検討

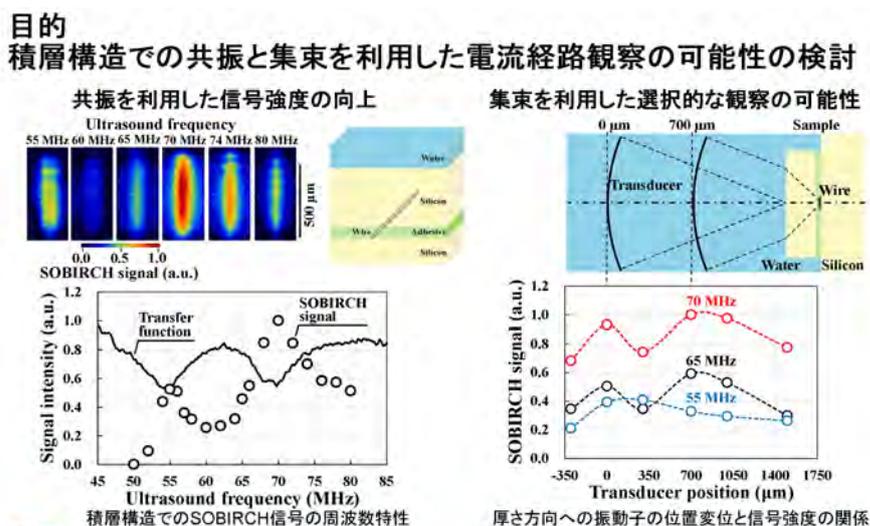
6.1 本章の目的と位置づけ

第6章では、積層構造を有する半導体デバイスの故障箇所絞込みへ提案手法が適用可能か、基礎検討を実施した。図6.1に、本章の要約を示す。

更なる多機能化や低消費電力化といった要求から、半導体デバイスは三次元的な集積化が施される趨勢にある。図6.2に、三次元集積化技術が適用されたデバイスの構造を模式的に示している。三次元的に集積化されたデバイスにおける積層構造を維持した故障箇所の絞込みには、封止樹脂の開封前に適用可能な手法が有効な手段になると期待されている [138, 139]。

積層構造を有するデバイスへのSOBIRCHの適用の際には、超音波の共振を利用した信号強度の向上が期待できる。加えて、超音波の集束を利用して所望のチップを選択的に観察可能なことも期待できる。

本章では、積層構造を有する半導体デバイスへのSOBIRCHの適用における基礎検討のため、簡易的な試料を用意し、超音波の共振と集束を利用した信号強度の関係について実験的に検証した。



結果

- 周波数と振動子の位置に対し、SOBIRCHの信号強度が顕著に変動
- 条件の適切な設定による、チップの選択的な観察の可能性を示唆

図6.1: 第6章の要約.

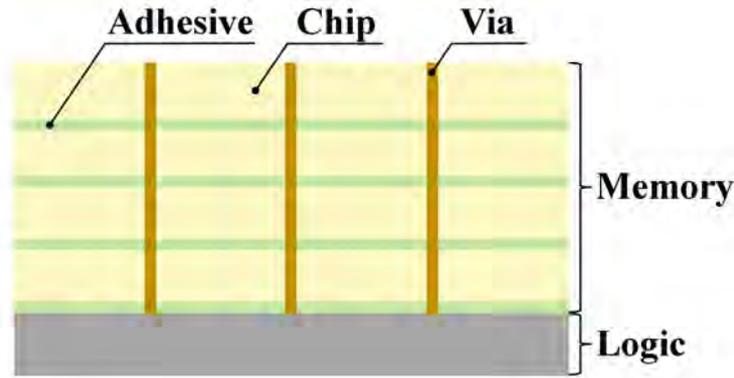


図 6.2: 半導体デバイスの積層構造の模式図.

6.2 積層構造での超音波の共振

6.2.1 本節の目的と内容

本節では、積層構造での超音波の多重反射と、多重反射により生じる超音波の共振について検証する。

他の研究グループより、超音波顕微鏡を利用した、積層構造で生じる多重反射の影響を考慮してチップ部に生じた亀裂などを観察する方法が報告されている [140–142]。他のグループからの研究報告や、第5章の議論より、SOBIRCH 信号の強度が半導体デバイスの積層構造内部で生じる共振の影響を強く受けることが予想される。

本節の実験では、試料からの反射波の周波数伝達関数より超音波の共振の影響の有無と共振周波数を確認した。そして、共振周波数の近傍で SOBIRCH 信号の周波数特性を測定し、共振を利用した信号強度の向上が可能か検討した。

6.2.2 測定試料と測定条件

■試料の構成

図 6.3 には、本節の検討で使用した、半導体デバイスのチップを一段のみ積層した試料の構造を模式的に示している。図 6.3(a) に、観察対象のアルミニウム配線のパターンを示す。観察対象の電流経路は第4章および第5章と同様の線幅 $2\ \mu\text{m}$ 、長さ $500\ \mu\text{m}$ のアルミニウム配線とする。

図 6.3(b) に、試料の積層構造を模式的に示す。図 6.3(a) のパターンのアルミニウム配線が蒸着されたシリコン基板の上に、接着剤により別なシリコン層が積層されている。接着剤の厚さとシリコンの厚さはそれぞれ、 $12\ \mu\text{m}$ と $60\ \mu\text{m}$ である。

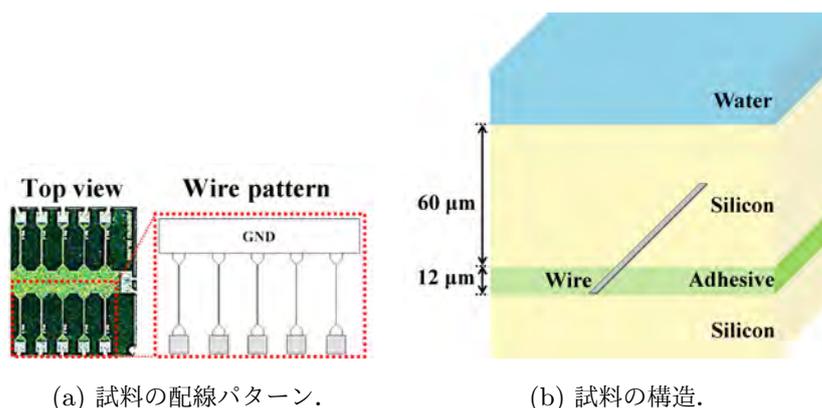


図 6.3: 半導体デバイスのチップが一段積層された構造を模した試料.

■測定条件

表 6.1 に測定で使用した振動子の形状と中心周波数をまとめている。この振動子を用いて、反射波の周波数伝達関数と、SOBIRCH 信号の周波数特性を測定した。

周波数伝達関数は、図 6.3(b) の積層構造からの反射波を 1 ns 間隔でサンプリングし、取得した時間波形をフーリエ変換して算出した。SOBIRCH 信号の周波数特性は、振動子に印加する連続波の周波数を変化させて SOBIRCH 像を取得し、計測した。SOBIRCH 像の取得においては、配線に 500 mV のバイアス電圧を印加し、変調周波数を 1 kHz に設定した。

表 6.1: 第 6.2 節の測定で使用した振動子の形状と中心周波数。

Center frequency (MHz)	Focal length (μm)	Aperture radius (μm)
80	4200	1200

6.2.3 実験結果と考察

6.2.3.1 試料からの反射波の周波数成分

図 6.4 に取得した反射波の時間波形を示す。図 6.4 の赤線は、観察対象の試料からの超音波の反射波である。図 6.4 の黒線が、参照物質として内部での多重反射を無視できる十分な厚さを有する、厚さ 3 mm 程度のアルミニウム板からの反射波形である。図 6.4 においては、それぞれの波形の絶対値の最大値が 1 となるように規格化されている。赤線の試料からの反射波には、内部での多重反射の影響とみられる振幅の小さな信号成分が確認できる。

図 6.5 に、図 6.4 の反射波から算出した、試料からの反射波の周波数伝達関数を示す。図 6.5 は、図 6.4 の時間波形を両者ともフーリエ変換し、試料からの反射波の周波数成分を、参照物質からの反射波の周波数成分で除し、算出した。図 6.5 には、55 MHz と 70 MHz の二か所に下に凸な傾向がみられる。超音波の共振は、55 MHz と 70 MHz に生じていることが予想される。

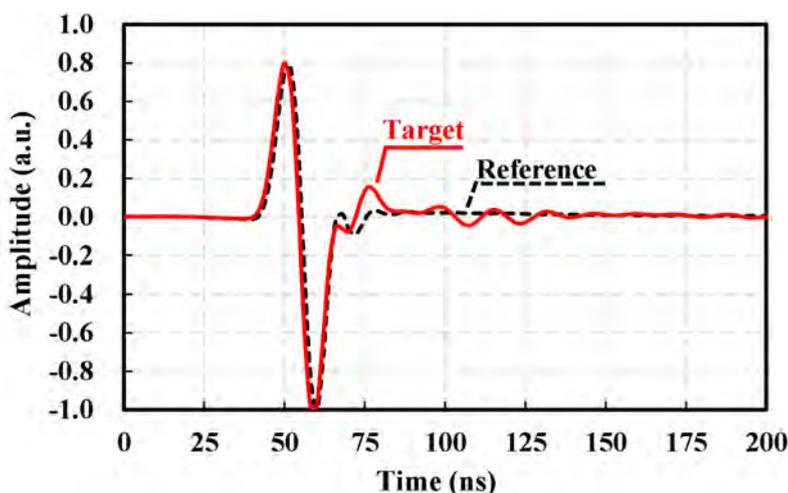


図 6.4: 試料からの反射波.

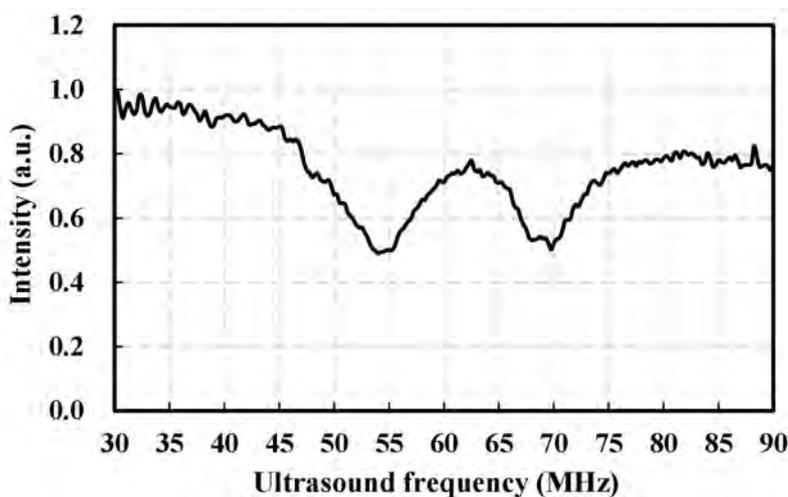


図 6.5: 反射波の周波数伝達関数.

6.2.3.2 SOBIRCH 信号の周波数特性

図 6.6 に、超音波の周波数を変化させて取得した SOBIRCH 像を示す。カラーバーは、規格化された SOBIRCH 信号の強度を示す。図 6.5 の反射波の周波数伝達関数から予想されたように、下に凸な傾向がみられた、55 MHz と 70 MHz で他の周波数での測定よりも高い信号強度を示した。

図 6.7 に SOBIRCH 信号の周波数特性を示す。図 6.7 の横軸は超音波の周波数、縦軸は信号強度を示す。図 6.7 中のプロットは、SOBIRCH 信号の強度を示している。図 6.7 中の実線は、図 6.5 の周波数伝達関数である。図 6.7 中のそれぞれの系列は、それぞれの最大値が 1 となるように規格化されている。図 6.7 において、反射波の周波数伝達関数で下に凸な周波数と、SOBIRCH 信号の周波数特性において上に凸な周波数が一致した。これは、共に、積層構造の内部において超音波の共振が生じているためと考えられる。

この結果より、試料が一段積層の場合には、反射波の周波数成分から積層構造での超音波の共振周波数を推定可能なことが示された。また、超音波の周波数を反射波より推定された共振周波数に設定することで、より高い信号強度で電流経路を観察可能なことが示された。

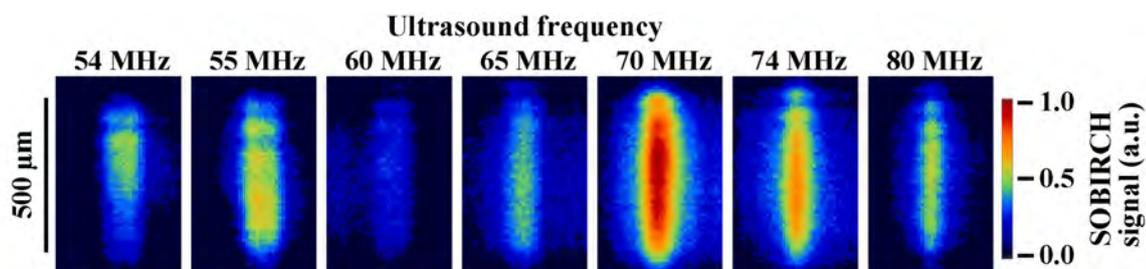


図 6.6: 超音波の周波数を変化させて測定した SOBIRCH 像.

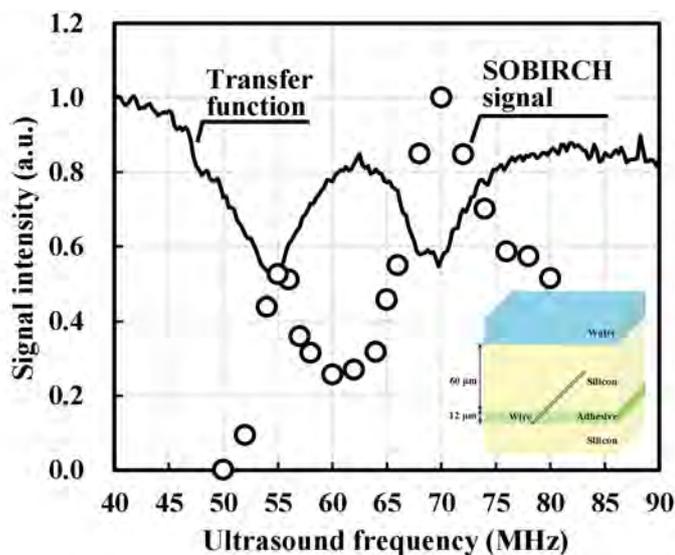


図 6.7: 超音波の周波数と SOBIRCH 信号の強度の関係.

6.2.4 本節のまとめ

チップが一段積層した場合について、積層構造の内部に生じる超音波の共振と SOBIRCH 信号の強度の関係について実験的に検証した。チップが一段積層された構造においては、超音波の共振周波数は反射波の周波数成分より推定可能なことが示された。SOBIRCH 信号は顕著な周波数特性をもち、反射波の周波数成分より推定された共振周波数のとき最も強い信号を示すことが確認された。

積層構造を有する半導体デバイスに対し、SOBIRCH による超音波の共振を利用して電流経路をより高感度に観察できる可能性が示唆された。

6.3 積層構造の厚さ方向への選択的な観察

6.3.1 本節の目的と内容

本節では、三次元的な集積化が施された半導体デバイスでの、SOBIRCH による積層構造の厚さ方向に対する選択的な観察について実験的に検証する。

SOBIRCH は、超音波の集束音響場を熱源として利用し電流経路を可視化する。超音波振動子の焦点距離は、振動子の周波数や開口径で決定される。超音波振動子と観察対象の試料との間の距離を変化させるこ

とで、振動子の焦点位置を積層構造の厚さ方向に対して調整できる。焦点位置を積層構造の厚さ方向に走査させることで、積層構造の所望のチップを選択的に観察できる可能性がある。

本節の実験では、前節と同じ試料に対して、振動子と試料間の距離を変化させつつ SOBIRCH 信号の強度を測定した。

6.3.2 測定試料と測定条件

測定試料には、前節の図 6.3 と同様のものを使用した。SOBIRCH 像の測定条件も、前節と同様に、配線に 500 mV のバイアス電圧を印加し、1 kHz の変調周波数を設定した。振動子から出射する超音波の周波数は、前節で共振が生じ最も強い信号強度が得られた 70 MHz に設定した。

図 6.8 に試料の厚さ方向への選択性の検討における、振動子の位置の定義を示す。変数 x として振動子が試料へ近づく方向を正の向きにとる。振動子の焦点位置が試料の最上面と一致している場合を基準とする。このときを $x = 0$ と定義する。測定上は、試料からの反射波の第一ピークが最も大きくなる位置を $x = 0$ の位置と定義する。

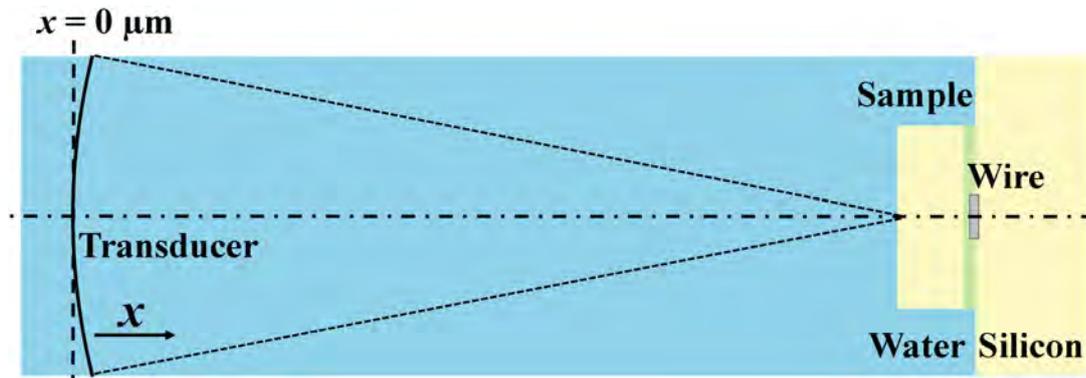


図 6.8: 超音波振動子と試料間の距離を変化させた測定における基準点の定義。

6.3.3 実験結果と考察

6.3.3.1 音波の透過率の角度依存性を考慮した焦点位置に関する簡易的な計算

実験に先立って、観察対象の電流経路に焦点が結ばれる位置を、音波の透過率の角度依存性を考慮した簡易的な計算より予想する。伝搬媒質は、図 6.8 において、接着剤と金属配線を見捨て、水とシリコンのみからなると仮定して、水-シリコン界面から約 $70 \mu\text{m}$ 程度離れた点に焦点が結ばれるときの条件を計算する。

水からシリコンへ、入射角 θ_i で音波が到来した時の音圧のエネルギー透過率 $T_c(\theta_i)$ は、

$$T_c(\theta_i) = \frac{4 \frac{Z_s}{Z_w} \frac{\cos(\theta_t)}{\cos(\theta_i)}}{\left(\frac{Z_s}{Z_w} + \frac{\cos(\theta_t)}{\cos(\theta_i)} \right)^2}. \quad (6.1)$$

ここで、 Z_s 、 Z_w 、 θ_t は、シリコンの音響インピーダンス、水の音響インピーダンス、水からシリコンへ透過した音波の屈折角である。 θ_t は、スネルの法則に従って、シリコンと水の音速および入射角 θ_i から決定される。シリコンと水の音速をそれぞれ、9000 m/s および 1500 m/s とし、シリコンと水の音響インピー

ダンスはそれぞれ、 $20 \cdot 10^6 \text{Ns/m}^3$ および $1.5 \cdot 10^6 \text{Ns/m}^3$ とした。

界面での屈折を考慮した音圧のエネルギー透過率は角度に応じて単調減少する。また、使用する超音波振動子は球面なため、振動子の球面上で等しい入射角を持つリング状の音源の円周が長くなり、角度 θ_i ごとの音圧が $\sin(\theta_i)$ の傾向で大きくなる。透過率 $T_c(\theta_i)$ に、 $\sin(\theta_i)$ をかけ、球面振動子での入射角に応じた音圧の増大を考慮すると、入射角が約 7° のとき、界面で屈折してシリコンへと透過する音圧のエネルギーが最大値を示す。したがって、シリコンを透過して電流経路を加熱する際は、約 7° で入射する音波が支配的な影響を及ぼしているとみなすことが出来る。

以上の考察を元に、加熱に支配的な影響を与えている約 7° で入射する音波と、振動子の中心軸近傍のほとんど垂直とみなせる角度で入射する音波の音路長が等しくなる時の振動子の位置 x を計算する。水-シリコン界面より距離 d の点に焦点を結ばせるには、振動子の位置 x は、水の音速 c_w 、シリコンの音速 c_s としたとき、垂直入射の音波の音路長と入射角約 7° (屈折角約 46°) の音波の音路長が等しくなるための、

$$x = \frac{c_w}{c_s} d \frac{\cos(\theta_t)}{\cos(\theta_i)} \frac{1 - \cos(\theta_i)}{1 - \cos(\theta_t)} \quad (6.2)$$

という条件をみたす必要がある。ここで、 $c_w = 1500 \text{ m/s}$ 、 $c_s = 9000 \text{ m/s}$ 、 $d = 70 \mu\text{m}$ とすると、振動子の位置 x は約 $700 \mu\text{m}$ となる。

以上の簡易的な計算より、振動子の位置 x を約 $700 \mu\text{m}$ に設定することで、実験試料において配線面上に焦点を結ぶことができ、SOBIRCH の信号強度が最大化すると予想できる。

6.3.3.2 周波数を 70 MHz 一定としたときの厚さ方向への走査

図 6.9 に、振動子と試料の間の距離を変化させ、試料の厚さ方向に振動子を走査させたときの SOBIRCH 像を示す。図 6.9 のカラーバーは最大値で規格化された SOBIRCH 信号の強度を示す。SOBIRCH 像の広がりには、大きな変化がみられなかった。積層構造の厚さ方向への走査に対し、SOBIRCH 像の空間分解能は大きな影響を受けないことが示唆された。

図 6.10 に、試料の厚さ方向に振動子を走査させたときの SOBIRCH 信号の強度の傾向を示す。図 6.10 の横軸は、図 6.8 で定義した振動子の位置を示している。図 6.10 の縦軸は、最大値で規格化した SOBIRCH 信号の強度を示している。

図 6.10 において、 $700 \mu\text{m}$ で最も強い信号強度が得られた。これは、振動子を、試料最上面に焦点が結ばれている状態から $700 \mu\text{m}$ ほど試料方向へ近づけた時に観察対象の配線に焦点が結ばれたためと考えられる。音響結合剤として用いる水の音速は約 1500 m/s であり、シリコンの音速は約 9000 m/s であり、水とシリコンでは音速が大きく違うため、界面に斜めに入射した音波は大きく屈折し、焦点は水-シリコン界面のごく近傍に形成される。したがって、シリコンの厚さは約 $70 \mu\text{m}$ にもかかわらず、配線に焦点を結ぶためには水の中で $700 \mu\text{m}$ 程度の振動子の位置の変位が必要になったと考えられる。以上の実験結果は、簡易的な計算から予想した振動子の位置 x とおよそ一致した。

この実験より、振動子を試料へ近づけつつ信号強度を監視することで、積層構造にある電流経路上に焦点を結ばせることができ、積層構造の所望のチップを選択的に観察できる可能性が示唆された。

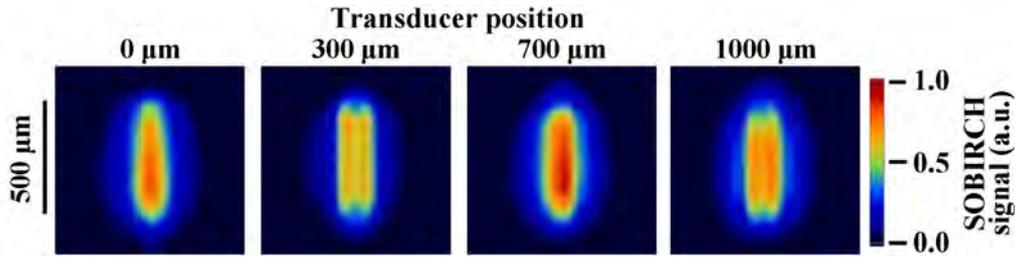


図 6.9: 超音波振動子の位置を試料へ近づけつつ測定した SOBIRCH 像.

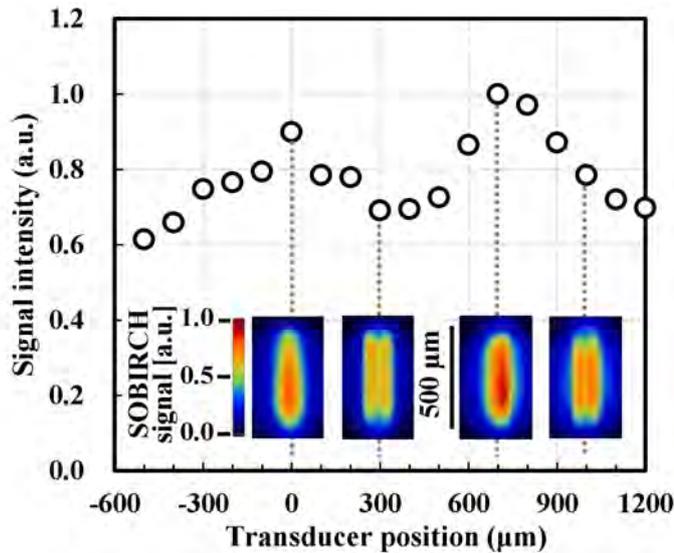


図 6.10: 超音波振動子の位置と SOBIRCH 信号の強度の関係.

6.3.3.3 周波数と振動子の位置の双方を変化させた測定

図 6.11 に、超音波の周波数を 55 MHz, 65 MHz, 70 MHz の三つに設定し、振動子の位置を変化させながら SOBIRCH の信号強度を測定した結果を示す。図 6.11 の横軸は、図 6.8 で定義した振動子の位置を示している。図 6.11 の縦軸は、最大値で規格化した SOBIRCH 信号の強度を示している。図 6.11 では、超音波の周波数が 70 MHz の場合の信号強度は他の周波数よりも強かった。

図 6.12 に超音波の周波数をさらに細かく設定して測定したときの SOBIRCH の信号強度と振動子の位置の関係を示している。図 6.12 の横軸は、図 6.8 で定義した振動子の位置を示している。図 6.12 の縦軸は、超音波の周波数を示している。図 6.12 のカラーバーは、最大値で規格化した SOBIRCH 信号の強度を示している。超音波の周波数が 70 MHz のときに振動子の位置を 700 μm に設定すると最も強い信号強度を示した。

以上の実験より、積層構造を有するデバイスへ SOBIRCH を適用する際には、積層構造での超音波の共振と集束を考慮し、超音波の周波数と振動子の位置を適切に選択することで信号強度を向上可能なことが示唆された。また、反射波から推定された共振周波数を用いて振動子を積層構造の厚さ方向へ走査することで、超音波の周波数と振動子の位置の調整により、積層構造の所望のチップを選択的に観察できる可能性も示唆された。

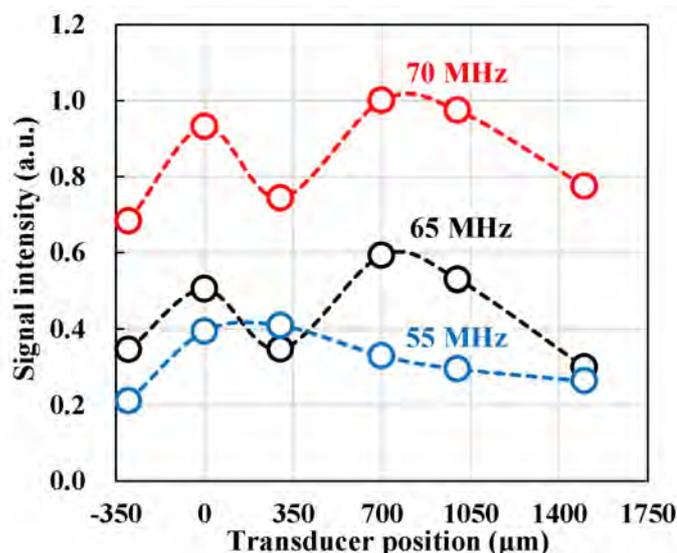


図 6.11: 異なる周波数での超音波振動子の位置と SOBIRCH 信号の強度の関係。

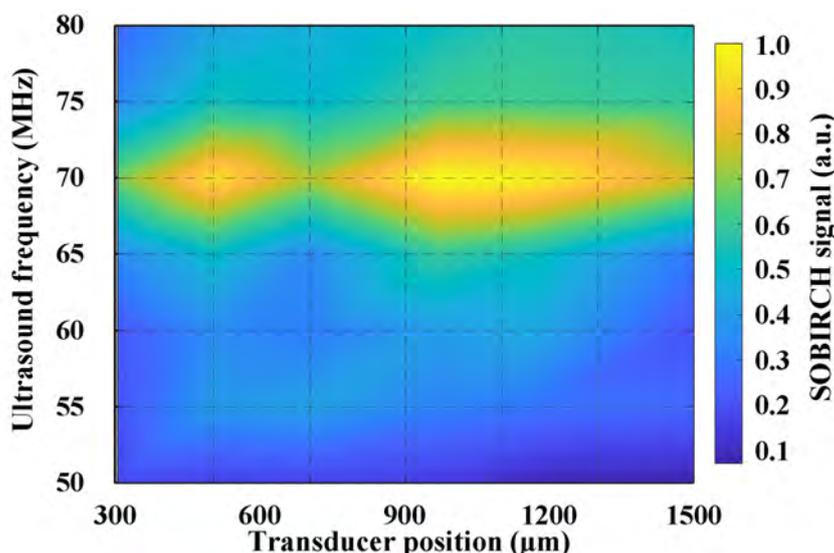


図 6.12: 超音波の周波数と振動子の位置を同時に変化させたときの SOBIRCH 信号の強度。

6.3.4 本節のまとめ

チップが一段積層された試料において、積層構造の厚さ方向に対し振動子を走査させたときの SOBIRCH 信号の強度について実験により検証した。振動子の位置の調整により、超音波の集束を利用して積層構造の所望のチップを選択的に観察できる可能性が示唆された。SOBIRCH の空間分解能は、積層構造の厚さに大きく左右されず、一定の空間分解能を維持したまま電流経路を観察できる可能性が示唆された。

SOBIRCH の空間分解能が厚さに大きく左右されないという可能性は、磁場や発熱を利用する他の手法との比較において大きな利点となりうる。積層構造の深いところの故障箇所から生じる磁場や発熱ほど、拡散が大きくなる。したがって、磁場や発熱を利用する手法は、原理的に、深いところの故障箇所を観察しようとするほど空間分解能が低下する。本節の結果は、三次元的な集積化が施された半導体デバイスにおける

故障箇所の絞込みにおいて、磁場や発熱を利用した手法とは異なる利点を SOBIRCH が有する可能性を示唆した。

しかしながら、振動子と試料間の距離と焦点位置の関係では、 $300\ \mu\text{m}$ の付近で信号強度が低下する傾向を説明できていない。三次元的な集積化が施されたデバイスにおける、積層構造の所望のチップに対する選択的な観察の可能性をより詳細に議論するには、更なる検討が必要と考えられる。

6.4 本章のまとめ

本章では、三次元的な集積化が施された半導体デバイスへの SOBIRCH の適用の基礎検討として、チップが一段積層された模擬試料を用意し実験を行った。本章の実験より、積層構造内部の電流経路の観察では、SOBIRCH 信号が顕著な周波数特性を持ち、もっとも強い信号が得られる超音波の共振周波数は、試料からの反射波より推定可能なことが示唆された。加えて、試料の厚さ方向に振動子を走査させることにより、積層構造の所望のチップに対し空間分解能を維持したまま選択的な観察を実施可能なことも示唆された。

しかし、実験結果には説明の難しい点も多い。今後は、積層構造での超音波の伝搬に関する理論的かつより詳細な議論が必要となると考えられる。チップが一段積層された試料での超音波の伝搬と信号強度の関係についてより詳細に検討した後、多段に積層されたより実用的な構造をもつ試料での検討へと議論を進めていく必要がある。

第7章

まとめと今後の課題

7.1 学位論文の総括

7.1.1 研究の目的

本学位論文では、計測技術としての提案手法の SOBIRCH の信号と超音波加熱の関係に対する波動の伝搬に基づいた検証を目的として研究を実施した。

半導体デバイスの信頼性の作り込みにおける故障解析の効率的な実施には、チップ部の故障箇所の段階的な絞込みが重要な役割を果たす。チップ部の故障箇所の絞込みには、半導体デバイスを覆う封止樹脂の開封作業が必要とされる。しかし、封止樹脂の開封作業は、故障の状態の変化と再現性の悪化を招き、故障解析を継続不能に陥らせる恐れがある。

封止樹脂の開封前にチップ部の故障箇所を大まかにでも把握できれば、局所的な開封が可能となり開封作業の労力低減と再現性を維持した故障箇所の絞込みにつながる。封止樹脂の開封前に適用可能な故障箇所絞込みのために磁場や発熱を利用する既存手法が提案されているが、空間分解能はあまり高くない。

本研究では、磁場や発熱を利用する既存手法よりも高い空間分解能を有する故障箇所絞込み手法として、超音波加熱を利用する SOBIRCH を提案した。本学位論文では、提案手法の SOBIRCH の信号と超音波加熱の関係について、第4章から第6章で議論した。

7.1.2 研究成果の要約

7.1.2.1 第4章のまとめ

■第4章の目的

超音波を利用した計測技術では、超音波の反射波を利用するのが一般的で、本研究が提案する SOBIRCH のような超音波加熱を計測に利用する例はほとんどみられない。SOBIRCH を用いた故障の観察に先立ち、基礎検討として、超音波加熱により電流変動を誘起可能か確認する必要がある。

第4章では、超音波加熱が電流変動を誘起し、SOBIRCH により電流経路の観察が可能か検証した。

■第4章の成果

実験結果から、SOBIRCHにより電流経路の可視化が可能なが示された。SOBIRCHの信号強度に関する実験と計算の比較から、電流変動が超音波加熱により誘起されていることを確認した。

第4章では、SOBIRCHにより電流経路の観察が可能なが明らかにした。

7.1.2.2 第5章のまとめ

■第5章の目的

第4章の議論より、SOBIRCHの信号は超音波加熱に起因していることが示された。封止樹脂の充填剤が散乱体として働き電流経路へ到達する超音波の強度を減衰させるため、封止樹脂が厚いほどSOBIRCHの信号強度の低下が予想される。

第5章では、封止樹脂を介してもSOBIRCHにより電流経路を観察可能か検証した。

■第5章の成果

実験より、封止樹脂を介してもSOBIRCHにより電流経路の観察が可能なが示した。SOBIRCHの信号強度は超音波加熱に起因するため、半導体デバイスの内部に生じる超音波の共振の影響を受ける。封止樹脂の厚さに対し超音波の周波数には共振に起因する最適値があり、周波数の最適値は反射波の周波数成分から推定可能なが示した。

第5章では、推定した最適値で故障箇所の絞込みを実施すると、SOBIRCHでの計測において故障をより明瞭に観察可能なが明らかにした。

7.1.2.3 第6章のまとめ

■第6章の目的

半導体デバイスには、更なる低消費電力化等の要求から、従来のチップを多段に積層する三次元集積化が施される趨勢にある。積層構造を有するデバイスに対し構造と故障の状態を維持しつつ故障解析を実施するには、SOBIRCHをはじめとする封止樹脂の開封前に適用可能な手法が有効な手段になる。

第6章では、積層構造へのSOBIRCHの適用の基礎検討として、積層構造における超音波の共振と集束を利用した電流経路観察の可能性について検証した。

■第6章の成果

チップが一段だけ積層された簡易的な模擬試料に対して実験を行った。この試料において、積層構造の内部に超音波の共振が生じ共振周波数が反射波の周波数成分から推定可能ながこと、共振を考慮した周波数の適切な選択によりSOBIRCH信号の強度を向上可能ながことを実験より示した。

加えて、超音波振動子と試料の間の距離を変化させた実験より集束の影響で信号強度に変動がみられたことから、SOBIRCHが積層構造の厚さ方向に対する所望のチップの選択的な観察の可能性を有することが示唆された。

7.1.3 研究成果の寄与

本学位論文では、超音波の伝搬に基づき、SOBIRCHの信号が超音波加熱に起因していることを明らかにした。本学位論文は、半導体デバイスの故障箇所をより明瞭に絞込むための提案手法のSOBIRCHの最適条件について、実験と超音波の伝搬に基づいた計算の双方から示した。本学位論文で議論した半導体デバイス内部での超音波の伝搬と電流変動の関係は、SOBIRCHの実用化の議論における理論的な基礎として寄与する。

表 7.1 に、SOBIRCH と封止樹脂の開封前に適用可能な既存手法の比較を示す。本学位論文での議論を通じ、SOBIRCH は他の手法に比べ高い空間分解能を有していることが示された。解析事例が少ないことが課題として挙げられるが、積層構造においては所望の層の選択的な観察の可能性を有していることも示唆された。本学位論文の議論を通じ、提案手法のSOBIRCHの実用化のためには更なる議論が必要ではあるが、他の既存手法と比較し、故障箇所絞込み手法として特徴的な点も有していることが示された。

表 7.1: 提案手法のSOBIRCH と封止樹脂の開封前に適用可能な既存の故障箇所絞込み手法の比較。

	本研究の提案手法 超音波加熱解析	封止樹脂開封前に適用可能な既存手法 磁場解析	封止樹脂開封前に適用可能な既存手法 発熱解析
樹脂の開封	不要	不要	不要
空間分解能 分解能の要因	○ 超音波の集束	△ 磁場の広がり	△ 熱の拡散
解析事例の蓄積 観察 できたもの	△ 短絡故障	○ 電流経路のみ	◎ 短絡故障, 高抵抗箇所
積層構造での 故障箇所絞込み	解析事例はないが、 他より高い空間分解能を 有し所望の層の選択的な 観察が期待できる。	解析事例はあるが、 空間分解能は あまり高くない	解析事例はあるが、 空間分解能は あまり高くない

7.2 今後の課題と展望

7.2.1 提案手法の適用限界に関する一検討

7.2.1.1 適用限界の要因

第 3 章の議論より、超音波加熱によって誘起される電流変動の大きさ $|\Delta I|$ は、次式のように表される。

$$|\Delta I| = \frac{\Delta R}{R^2} V_b. \quad (7.1)$$

式 (7.1) において、 ΔR , R , V_b はそれぞれ、抵抗変動量、超音波加熱以前の電流経路の抵抗値、電流経路に印加するバイアス電圧を表している。式 (7.1) より、SOBIRCH の信号強度を意味する電流変動の大きさは、抵抗変動の大きさと電流経路全体の抵抗値より決定されることがわかる。

抵抗変動の大きさは、超音波加熱によって生じる温度上昇量に左右されるため、封止樹脂の厚さの影響を受ける。電流経路全体の抵抗値は、経路の長さや細さといった、経路の形状の複雑さの影響を受ける。

提案手法の SOBIRCH の適用限界に関し、封止樹脂の厚さと電流経路の複雑さについて考察する。

7.2.1.2 封止樹脂の厚さ

第5章の実験結果をもとに、封止樹脂の厚さと SOBIRCH の信号強度の関係について、適用限界の観点から考察する。図7.1に、第5章の図5.7において数値計算の結果を外挿したものを示す。図7.1の横軸は封止樹脂の厚さ、第一縦軸は樹脂の厚さが 320 μm の場合の信号強度を基準としたときの比を示している。図7.1の第二縦軸は、測定系の増幅率から概算した電流変動の大きさのオーダーを示している。

図7.1より、封止樹脂が約 500 μm 厚くなるごとに信号強度が 20 dB 低下する傾向が読み取れる。車載向けとして使用されるマイクロコントローラなどの半導体デバイスの封止樹脂の厚さは、一般に 300 μm から 1000 μm とされている。したがって、マイクロコントローラなどのデバイスに対し SOBIRCH を適用可能なことが図7.1から読み取れる。一方、封止樹脂が極めて厚い場合に対して SOBIRCH を直接的に適用するのは容易ではないことも読み取れる。しかし、封止樹脂は厚さを薄くすることが可能であり、また、第5章の議論より一般的な厚さの範囲においては電流経路の観察が行えているため、封止樹脂の厚さで規定される適用限界には現状の測定系でも十分に対応可能なものと判断できる。

適用範囲の拡大には、出射可能な超音波の強度を向上させてより大きな電流変動を誘起可能にするとともに、測定系の増幅率や S/N 比を改善し、より小さな電流変動を検出可能とする必要がある。

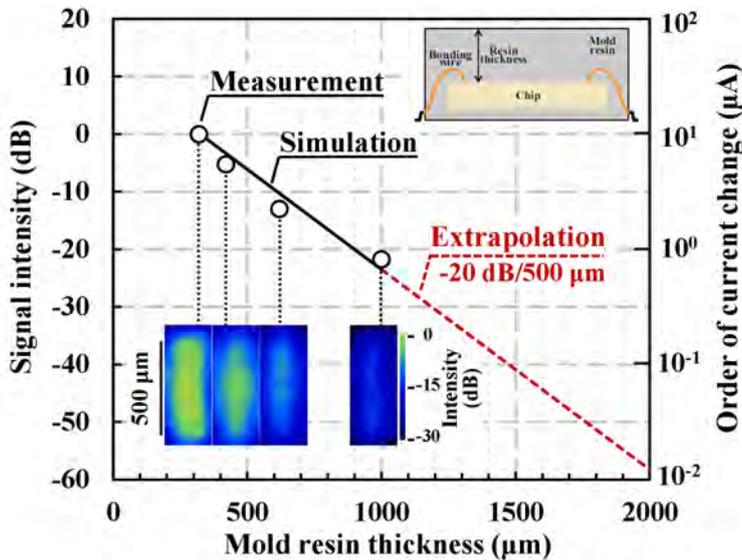


図 7.1: 第5章の実験結果に基づいた SOBIRCH の信号強度と封止樹脂の厚さの関係。

7.2.1.3 電流経路の複雑さ

■多層配線構造について

半導体デバイスの配線は、微細化に伴う配線の抵抗値および信号遅延の増大を抑制する目的で、多層構造により、長距離を接続する配線ほど太く、短距離を接続する配線ほど細く設計される。

多層配線構造は、金属配線、層間絶縁膜、バリアメタルなどからなる。層間絶縁膜の材料は、低誘電率化を目的として、数 nm 程度の大きさの空孔を含んだ多孔質な有機ケイ素高分子 (SiCOH) が一般的に使用されている。バリアメタルは、金属配線から層間絶縁膜へ正イオンが侵入するのを防ぐ目的で、Ta などが主に利用されており、一般的にその厚さは数 nm 程度である。層間絶縁膜中の空孔とバリアメタルは SOBIRCH で加熱に使用する数十 MHz 程度の超音波の波長 (数十 μm 程度) より極めて小さい。配線も太いものでも数 μm であり、超音波の波長より小さい。

多層配線構造の全体の厚さは数十 μm 程度と薄く、かつ、その内部の構造は波長に対して極めて小さい。したがって、多層配線構造では散乱による超音波の強度の低下は予想されるものの、多層配線構造を介しても超音波により電流経路を加熱可能なことが期待できる。多層配線では、構造の複雑化に伴う抵抗値の増大が適用限界を規定すると考えられる。

■適用限界の考察のための簡易的なモデル

SOBIRCH は封止樹脂の開封前での適用を想定した手法なため、故障箇所へ電流を供給するにはボンディングワイヤを介した電流経路が必要になる。半導体デバイスのチップの大きさは一辺が数 mm なため、配線の構造が複雑なほど抵抗値が大きくなり SOBIRCH の信号強度の低下が予想される。

図 7.2 には、電流変動について考察するための簡易的な計算モデルを示している。図 7.2 では、中央部分が細線化された金属配線を想定し、全長 y だけを変数とし、幅の比 w/W と厚さの比 h/H と長さの比 l/L はそれぞれ $1/2$ で常に一定とした。一定のバイアス電圧 V_b を印加した状態で配線の中央から左右対称に半値幅 $100 \mu\text{m}$ の温度分布がガウス関数状に生じているとし、電流変動の大きさを計算する。

図 7.2 のモデルに対し、第 3 章で議論した SOBIRCH の信号強度の式において、ガウスの誤差関数 erf を用い、電流変動 $|\Delta I|$ を、次のように修正する。

$$|\Delta I| = \frac{V_b T_0 \alpha \sigma \sqrt{\pi}}{\rho} \frac{HW}{y^2} \frac{\text{erf}(y/2\sigma)}{2^2} \left(1 + 3 \frac{\text{erf}(y/6\sigma)}{\text{erf}(y/2\sigma)} \right). \quad (7.2)$$

ここで、 T_0 と σ は温度分布の最大値とその標準偏差であり、 ρ と α は配線の抵抗率と抵抗温度係数である。第 3 章の議論を修正して得られた式 (7.2) を用いて電流経路の長さや信号強度の関係を考察する。

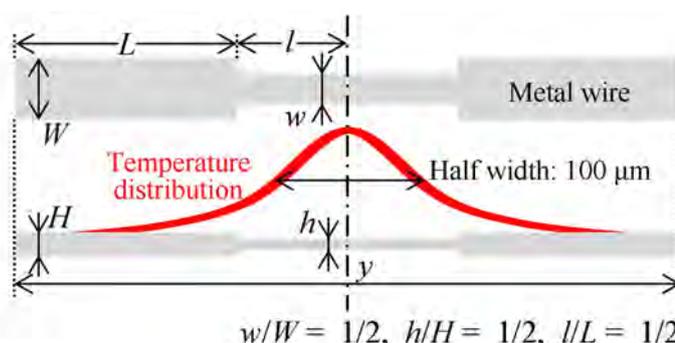


図 7.2: 第 3 章の議論を利用して電流経路の長さや電流変動の大きさを考察するための簡易モデル。

■電流経路の複雑さと信号強度の関係

図 7.3 に、式 (7.2) を用いて計算した信号強度を示す。計算においては、 $y = 500 \mu\text{m}$ 、 $H = 0.5 \mu\text{m}$ 、 $W = 2 \mu\text{m}$ のアルミニウム配線で得られる信号強度が 1 となるように規格化した後、対数を取り単位を dB として表示する。図 7.3 の横軸は、図 7.2 で定義した配線の全長 y を示している。図 7.3 の縦軸は対数表示した SOBIRCH の信号強度を示している。図 7.3 の縦軸の 0 dB は、封止樹脂の厚さに関する適用限界の議論での図 7.1 の 0 dB と同等な信号強度が得られることを意味している。

図 7.3 中の実線は、式 (7.2) を用いた図 7.2 のモデルに関する SOBIRCH の信号強度の計算結果である。図 7.3 中の破線は、比較のために、線の太さを均一にしたときの計算結果を示している。配線が長いほど配線の抵抗値が大きくなり信号強度が低下するため、図 7.3 の計算結果はすべて右下がりの線となっている。長さが同じでも細いほど抵抗値が大きくなるため、黒い破線の計算結果では配線が細いほどより小さな信号強度を示した。

電流経路の全長が数 mm 程度と温度分布の半値幅よりも十分に長い場合には、全長 $\sqrt{10}$ 倍または断面積 $1/10$ 倍ごとに超音波加熱で誘起される電流変動の大きさが 20 dB 低下する傾向を読み取ることができる。図 7.1 の結果から、現行の測定系の限界は -20 dB の近傍にあると読み取れるため、より長くより細い電流経路を SOBIRCH で観察するためには、測定系のさらなる改良が必要となる。

ここでの議論だけで、提案手法の SOBIRCH の適用限界を明らかにすることは困難だが、以上のような方針に基づいて電流経路の複雑さと信号強度の関係についてより詳細に議論することで、SOBIRCH の適用限界について明らかにできるものと考えられる。

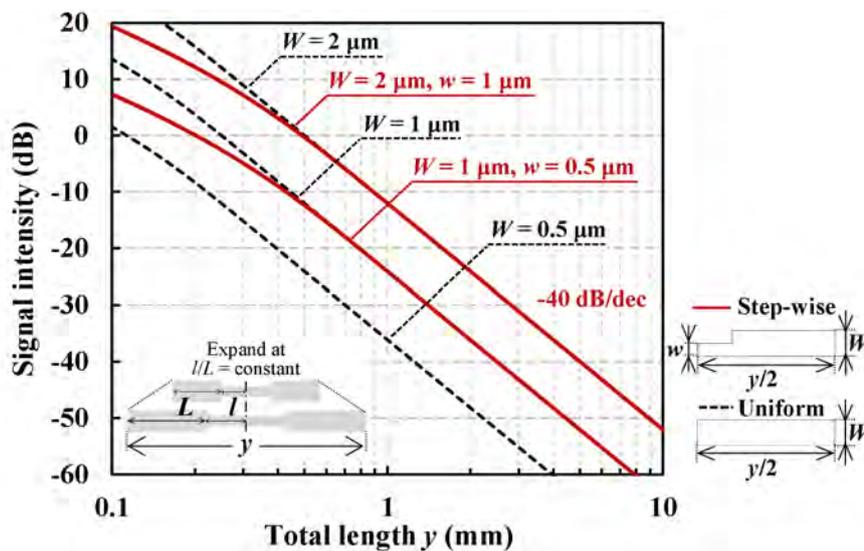


図 7.3: 第 3 章の議論に基づいた SOBIRCH の信号強度と配線長の関係についての計算例。

7.2.2 実用化の課題

7.2.2.1 課題 1: 解析事例の蓄積

実用化には、SOBIRCH を用いた解析事例を十分に蓄積させる必要がある。現在では、半導体デバイスの故障解析への SOBIRCH の適用事例は少ないため、SOBIRCH で観察可能な故障の大きさや種類に関する議論は十分ではない。積層構造を有するデバイスへの適用に関しても、基礎検討しか着手できておらず、実際の故障の観察事例はまだない。

解析事例の蓄積は、SOBIRCH の実用化における最重要な課題と考える。

7.2.2.2 課題 2: 積層構造を有するデバイスへの適用に関するより詳細な検討

第 6 章の一段のみ積層された試料でも、一般的な超音波の伝搬に関する知見では実験結果を十分には説明できていない。積層構造の内部での超音波の多重反射が複雑に影響していると考えられる。多段に積層した試料での検討に先立ち、詳細な波動場解析などを利用した理論的な議論が必要となる。

シリコン基板の音速が約 9000 m/s 程度と大きいため、取差が大きくなり、所望の層の選択的な観察においては、試料の厚さ方向の分解能の向上が必要となる。ビームフォーミングや非球面レンズなどを利用した取差の補正などを行い、空間分解能を向上させる手立てについても議論する必要がある。

7.2.2.3 課題 3: 測定系の改良および画像処理の利用による空間分解能の向上

■測定系の感度向上

適用限界に関する一検討の項で議論したように、封止樹脂が厚いほど、樹脂中の充填剤による超音波の散乱の影響で電流経路に到達する超音波の強度が低下し、電流変動が小さくなる。また、電流経路が複雑なほど、経路全体の抵抗値が増大し、さらに電流変動が小さくなる。

SOBIRCH の適用限界の拡大のためには、電流アンプの最小分解能および出射可能な超音波の強度の改善などにより、測定系の感度を向上させる必要がある。

■水以外の音響結合材の検討

SOBIRCH に限らず超音波顕微鏡を利用した半導体デバイスの故障解析技術においては、音響結合材として水が必要な点に実用上の懸念がある。封止樹脂には難燃性の向上などの観点から芳香族系の化合物が添加されており、これらが外部の湿気の影響を受けイオン性伝導体として働き樹脂中で電気化学的な反応を起こす。これが原因となって配線の腐食といった故障が生じる恐れがあり、水以外の物質で音響結合を達成できれば、SOBIRCH や超音波顕微鏡の利便性をさらに向上可能と期待できる。

対策としては、エポキシ樹脂などで解析対象の半導体デバイスの全体を覆い水と封止樹脂の接触を断つ、あるいは、超音波の周波数を著しく低下させ空気を音響結合材として利用する、といった方法が考えられる。しかし、これらの方法は、超音波の取差が大きくなり空間分解能の低下が予想される。水以外の音響結合材を利用する場合は、後述のビームフォーミング等を併用し空間分解能を改善する必要がある。

■画像処理やビームフォーミングを利用した空間分解能の向上

SOBIRCH の空間分解能の向上についても超音波の伝搬の観点から議論する必要がある。SOBIRCH の信号は、超音波振動子が形成する音響場を熱源とした温度上昇に起因している。第4章で議論したように、音響場と温度分布の関係に基づけば、SOBIRCH 像の点像分布関数を議論できる。

音響場の形状と SOBIRCH 像の点像分布関数をより詳細に議論することで、ビームフォーミングや画像処理などにより SOBIRCH 像の空間分解能を向上可能と期待できる。

7.2.3 提案手法の展望

自動車には現在でさえ各種制御ユニット等に膨大な数の車載用半導体が組み込まれている。自動運転などの趨勢を鑑みれば、半導体デバイスの信頼性や歩留まりの向上のためには、SOBIRCH をはじめとした種々の故障解析技術は産業界において今まで以上に重要な役割を担う。

図 7.4 には、SOBIRCH の実用化後に予想される、既存手法と SOBIRCH の相補的な組み合わせについて概念的に図示している。SOBIRCH と他の手法は異なる物理現象を利用するため、同一の故障箇所に対する観察結果になんらかの差異が生じると考えられる。三つの手法を用いた観察結果の比較から、故障原因に関するより深い情報が得られれば、適切な開封方法の選定やチップ部の絞込みのより円滑な実施が可能となると予想される。

本研究で提案する SOBIRCH が実用化され既存手法との相補的な運用が可能となれば、将来的に、半導体デバイスの故障解析のより円滑な実施に貢献でき、ひいては、半導体デバイスの信頼性向上や歩留まり向上の促進にも貢献しうるものと期待できる。

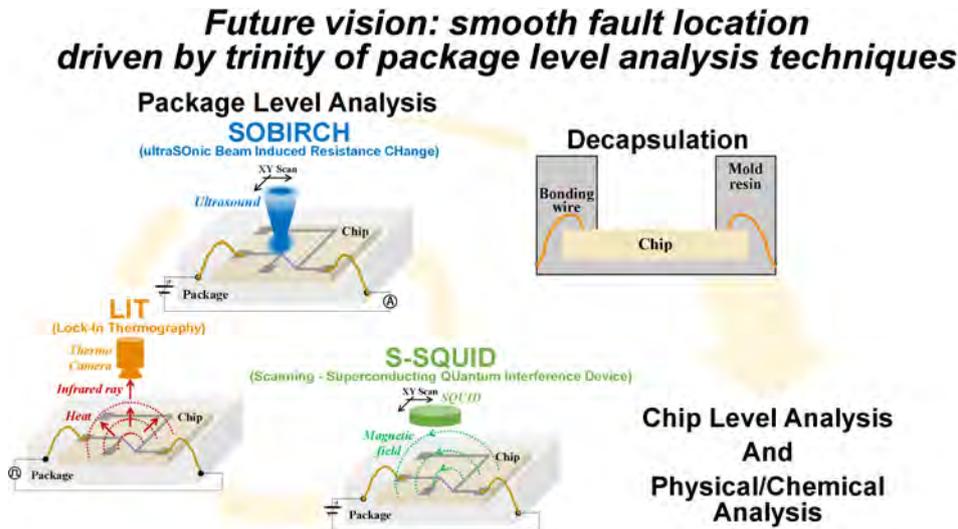


図 7.4: 半導体デバイスの故障解析に対する SOBIRCH の将来的な貢献。

参考文献

- [1] 藤木正也, 塩見弘, “エレクトロニクスにおける信頼性”, 電子情報通信学会, p. 1, 1978.
- [2] M. Riordan, L. Hoddeson, C. Herring, “The Invention of Transistor”, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 71, No. 2, S336, 1999.
- [3] L. Hoddeson, “The discovery of the point-contact transistor”, *Historical Studies in the Physical Sciences*, Vol. 12, pp. 41 - 76, 1981.
- [4] 吉本雅彦 編著, “集積回路工学”, オーム社, pp. 1 - 4, 2013.
- [5] 福田益美, 平地康剛, “GaAs 電界効果トランジスタの基礎”, pp. iv - v, 電子情報通信学会, 1992.
- [6] ICinsight Research Bulletin, “Semiconductor Units Forecast To Exceed 1 Trillion Devices Again in 2021”, p. 1, 2021, <https://www.icinsights.com/data/articles/documents/1363.pdf>.
- [7] Web site: World Semiconductor Trade Statistics (WSTS) homepage, <https://www.wsts.org/>, 2021 年 8 月 30 日時点.
- [8] 経済産業省, “平成 29 年度我が国におけるデータ駆動型社会に係る基盤整備（電子デバイス産業及びその関連産業における市場動向及び政策動向調査）報告書”, p. 11, 2017, <http://www.meti.go.jp/meti.lib/report/H29FY/000881.pdf>.
- [9] IEEE International Roadmap for Devices and Systems (IRDS), “Executive summary of IRDS report 2020 Edition”, p. 2, 2020, https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2020/2020IRDS_ES.pdf.
- [10] Cisco, “Cisco Global Cloud Index 2015 - 2020”, p. 11, 2016, https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/service-provider/ciscoknowledgenetwork/files/622.11.15-16-Cisco_GCLCKN_2015-2020_AMER_EMEAR_NOV2016.pdf.
- [11] 二川清, 塩野登, 横川慎二, 福田保裕, 三井泰裕, “LSI の信頼性”, 日本科学技術連盟, pp. 2 - 12, 2010.
- [12] 藤木正也, 塩見弘, “エレクトロニクスにおける信頼性”, 電子通信学会, pp. 2 - 5, 1978.
- [13] 真壁肇, 鈴木和幸, “品質管理と品質保証, 信頼性の基礎”, 日本科学技術連盟, pp. 7 - 30, 2018.
- [14] 真壁肇, 鈴木和幸, 益田昭彦, “品質保証のための信頼性入門”, 日本科学技術連盟, pp. 44 - 67, 2002.
- [15] 真壁肇, 鈴木和幸, 益田昭彦, “品質保証のための信頼性入門”, 日本科学技術連盟, pp. 13 - 20, 2002.
- [16] 門田靖, “信頼性と安全性”, 日本科学技術連盟, pp. 12 - 18, 2012.
- [17] 田中健次, “システムの信頼性と安全性”, 朝倉書店, pp. 1 - 16, 2014.
- [18] 道上勉, 向殿政男, 伊藤誠, 土肥正, “信頼性・安全性工学”, オーム社, pp. 1 - 14, 2009.

- [19] 山本正宣, “信頼性と安全性について 日本信頼性学会の安全への取り組み”, 日本信頼性学会, Vol. 49, No. 6, pp. 413 - 417, 2010.
- [20] 向殿政男, “ためになる安全学 第5回 信頼性と安全性の関係”, プラントエンジニア, pp. 62 - 63, 2010, <https://www.mukaidono.jp/anzenessay/dai5anzengaku.pdf>.
- [21] 向殿政男, “信頼性と安全性”, Software Reliability Enhancement Center (SEC) journal, Vol. 10, No. 3, pp. 8 - 10, 2014.
- [22] 真壁肇, 鈴木和幸, 益田昭彦, “品質保証のための信頼性入門”, 日本科学技術連盟, pp. 69 - 84, 2002.
- [23] 真壁肇, 鈴木和幸, “品質管理と品質保証, 信頼性の基礎”, 日本科学技術連盟, pp. 75 - 79, 2018.
- [24] 益田昭彦, 鈴木和幸, 二川清, 島川邦幸, 石田勉, 渡辺良道, 山悟, 佐伯輝憲, 太田周一, 横川慎二, “信頼性七つ道具”, 日本科学技術連盟, pp. 2 - 17, 2008.
- [25] 益田昭彦, 鈴木和幸, 二川清, 石田勉, 原田文明, 古園博幸, 渡辺良道, “信頼性七つ道具 応用編”, 日本科学技術連盟, pp. 2 - 24, 2020.
- [26] 益田昭彦, “JIS Z 8115 ディペンダビリティ (信頼性) 用語の現状と将来”, IEICE Fundamentals Review, Vol. 9, No. 4, pp. 318 - 329, 2016.
- [27] 二川清, “新板 LSI 故障解析技術”, 日本科学技術連盟, pp. 2 - 26, 2011.
- [28] 二川清, “はじめてのデバイス評価技術 第2版”, 森北出版, pp. 1 - 28, 2012.
- [29] 沖エンジニアリング株式会社 編, “現場の評価技術者による 実践! 電子部品の信頼性評価・解析ガイドブック”, 日刊工業新聞社, pp. 225 - 226, 2014.
- [30] 沖エンジニアリング株式会社 編, “セットメーカー必須! 電子部品の信頼性評価・解析ガイドブック Part2”, 日刊工業新聞社, pp. 219 - 237, 2016.
- [31] 沖エンジニアリング株式会社 編, “実践! 電子部品の信頼性評価・解析ガイドブック Part3”, 日刊工業新聞社, pp. 94 - 103, 2018.
- [32] ルネサスエレクトロニクス株式会社, “信頼性ハンドブック: 第4章”, pp. 1 - 53, 2017, <https://www.renesas.com/jp/ja/document/oth/semiconductor-reliability-handbook?language=ja&r=1054141>.
- [33] ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社, “半導体品質・信頼性ハンドブック 第3版: 第5章”, pp. 1 - 37, 2018, https://www.sony-semicon.co.jp/csr/common/pdf/Handbook_j_201812.pdf.
- [34] 東芝デバイス&ストレージ株式会社, “半導体信頼性ハンドブック”, pp. 45 - 102, 2018, <https://toshiba.semicon-storage.com/content/dam/toshiba-ss-v2/master/en/semiconductor/knowledge/reliability/reliability-handbook-tdsc.pdf>.
- [35] 日本経済新聞出版, “日本の品質再定義”, 日経ものづくり 7月号, pp. 43 - 69, 2021.
- [36] 二川清, “故障解析技術”, 日本科学技術連盟, pp. 1 - 36, 2008.
- [37] 二川清, 上田修, 山本秀和, “半導体デバイスの不良・故障解析技術”, 日本科学技術連盟, pp. 1 - 22, 2019.

- [38] 松岡敏成, “数と時間の壁への挑戦”, 日本信頼性学会誌, Vol. 34, No. 1, pp. 40 - 42, 2012.
- [39] J.M. Chin, V. Narang, X. Zhao, M.Y. Tay, A. Phoa, V. Ravikumar, L.H. Ei, S.H. Lim, C.W. Tao, S. Zulkiffi, M.C. Ong, M.C. Tan, “Fault isolation in semiconductor product, process, physical and package failure analysis: Importance and overview”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 51, pp. 1440 - 1448, 2011.
- [40] 二川清, 上田修, 山本秀和, “半導体デバイスの不良・故障解析技術”, 日本科学技術連盟, pp. 30 - 65, 2019.
- [41] P. Jacob, G. Nicoletti, F. Hauf, “Device decapsulated (and/or depassivated) - Retest ok - What happened?”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 47, pp. 1574 - 1579, 2007.
- [42] S. Murali, N. Srikanth, “Acid Decapsulation of Epoxy Molded IC Packages With Copper Wire Bonds”, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, Vol. 29, No. 3, pp. 179 - 183, 2006.
- [43] H. Endoh, T. Naoe, “Copper wire bonding package decapsulation using the anodic protection method”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 55, pp. 207 - 212, 2015.
- [44] T. Naoe, H. Komoda, “Decapsulation technique using electrochemical etching for failure analysis of WLSCSP n-type Si assembled module devices”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 52, pp. 3017 - 3021, 2012.
- [45] C.P. Liu, J.Y. Lin, Y.F. Liu, S.J. Shang, “Facile chemical method of etching polyimide film for failure analysis (FA) applications and its etching mechanism studies”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 54, pp. 911 - 920, 2014.
- [46] M. Krüger, J. Krinke, K. Ritter, B. Zierle, M. Weber, “Laser-assisted decapsulation of plastic-encapsulated devices”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 43, pp. 1827 - 1831, 2003.
- [47] T. Kurita, N. Kasashima, H. Yamakiri, N. Ichihashi, N. Kobayashi, K. Ashida, S. Sasaki, “Development of the new IC decapsulation technology”, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 49, pp. 1216 - 1223, 2011.
- [48] C.P. Liu, Y.F. Liu, C.H. Li, H.C. Cheng, Y.C. Kung, J.Y. Lin, “A novel decapsulation technique for failure analysis of epoxy molded IC packages with Cu wire bonds”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 52, pp. 725 - 734, 2012.
- [49] A. Aubert, L.D. Morais, J.P. Rebrassé, “Laser decapsulation of plastic packages for failure analysis: Process control and artefact investigations”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, pp. 1144 - 1148, 2008.
- [50] P. Schwindenhammer, H. Murray, P. Descamps, P. Poirier, “Determination of temperature change inside IC packages during laser ablation of molding compound”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, pp. 1263 - 1267, 2008.
- [51] A. Aubert, J.P. Rebrassé, L.D. Morais, N. Labat, H. Frémont, “Failure analysis case study on a

- Cu/low-k technology in package: New front-side approach using laser and plasma de-processing”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 50, pp. 1688 - 1691, 2010.
- [52] S. Manoharan, C. Pate, P. McCluskey, M. Pecht, “Effective decapsulation of copper wire-bonded microelectronic devices for reliability assessment”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 84, pp. 197 - 207, 2018.
- [53] X. Ma, D.G. Yang, G.Q. Zhang, “Decapsulation methods for Cu interconnection packages”, *Proceedings of 13th IEEE International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP)*, pp. 1387 - 1391, 2012.
- [54] T. Shaffus, P. Albert, W. Breuer, D. Debie, M. Graml, C. Hollerith, F. Kroninger, W. Mack, H. Pfaff, M. Schaffus, J. Walter, “Influence of sample preparation on intrinsic stresses inside a model chip - First results of partial decapsulation”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 88-90, pp. 299 - 303, 2018.
- [55] R.C. Jaklevic, J. Lambe, A.H. Silver, J.E. Mercereau, “QUANTUM INTERFERENCE EFFECTS IN JOSEPHSON TUNNELING”, *Physical Review Letters*, Vol. 12, No. 7, pp. 159 - 160, 1964.
- [56] L.A. Knauss, B.M. Frazier, H.M. Christen, S.D. Silliman, K.S. Harshavardhan, E.F. Fleet, F.C. Wellstood, M. Mahanpour, A. Ghaemmaghami, “Detecting Power Shorts from Front and Backside of IC Packages Using Scanning SQUID Microscopy”, *Proceedings of 25th ASM International Symposium for Testing and Failure Analysis (ISTFA)*, pp. 11 - 16, 1999.
- [57] L.A. Knauss, B.M. Frazier, A.B. Cawthorne, E. Budiarto, R. Crandall, S. Melnik, C. Bennett, “Backside Fault Isolation Using a Magnetic Field Imaging System on SRAMs with Indirect Shorts”, *Proceedings of 26th ASM International Symposium for Testing and Failure Analysis (ISTFA)*, pp. 503 - 507, 2000.
- [58] L.A. Knauss, A.B. Cawthorne, N. Lettsome, S. Kelly, S. Chatraphorn, E.F. Fleet, F.C. Wellstood, W.E. Vanderlinde, “Scanning SQUID microscopy for Current imaging”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 41, pp. 1211 - 1229, 2001.
- [59] S. Hsiung, K.V. Tan, A.J. Komrowski, D.J.D. Sullivan, J. Gaundestad, A. Orozco, E. Talanova, L.A. Knauss, “Failure Analysis on Resistive Openes with Scanning SQUID Microscopy”, *Proceedings of 42th Annual International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, pp. 611 - 612, 2004.
- [60] R. Schlangen, H. Deslandes, T. Lundquist, C. Schmidt, F. Altmann, K. Yu, A. Andreev, S. Li, “Dynamic Lock-in thermography for operation mode-dependent thermally active fault localization”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 50, pp. 1454 - 1458, 2010.
- [61] P.K. Kuo, T. Ahmed, H. Jin, R.L. Thomas, “Phase -Locked Image Acquisition in Thermography”, *Proceedings of The International Society for Optics and Photonics (SPIE)*,

- Vol. 1004, pp. 41 - 45, 1988.
- [62] D. Wu, J. Rantala, W. Karpen, G. Zengzinger, B. Schoenbach, W. Rippel, R. Stegmüller, L. Diener, G. Busse, “APPLICATIONS OF LOCK-IN-THERMOGRAPHY METHODS”, Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 15, pp. 511 - 518, 1996.
- [63] O. Breitenstein, J.P. Rakotoniaina, F. Altmann, J. Schulz, G. Linse, “Fault localization and functional testing of ICs by lock-in thermography”, Proceedings of 28th ASM International Symposium for Testing and Failure Analysis (ISTFA), pp. 29 - 36, 2002.
- [64] C. Schmidt, F. Altmann, “Non-destructive defect depth determination at fully packaged and stacked die devices using Lock-in Thermography”, Proceedings of 17th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA), 2010.
- [65] M. Xie, T. Begala, K. Kijkanjanapaiboon, D. Goyal, “Innovations in Fault Isolation Methods for 3D Packages with 10X Improvement in Accuracy”, Proceedings of 66th IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2016.
- [66] B.V. Ravi, M. Xie, D. Goyal, “Effect of Interaction between Multiple Defects on Z-depth Estimation in Lock-in Thermography Applications”, Proceedings of 68th IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2018.
- [67] 越川一成, 松本徹, 嶋瀬朗, “サーマルロックイン法による発熱解析”, 信頼性学会誌, Vol. 37, No. 6, pp. 316 - 321, 2015.
- [68] H. Jang, J. Ha, K. Jhagn, J. Lee, “Reliability Evaluation of Semiconductor using Ultrasound”, Electronic Materials and Packaging, pp. 335 - 340, 2001.
- [69] S. Satonaka, K. Ueno, M. Taira, S. Goto, “Ultrasonic Evaluation of Wire Bonded Areas in Semiconductor Devices”, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol. 21, pp. 546 - 552, 2003.
- [70] H. Frémont, J.Y. Delétage, K.W. Zaage, Y. Danto, “How to study delamination in plastic encapsulated devices”, Microelectronics Reliability, Vol. 44, pp. 1311 - 1316, 2004.
- [71] K. Sakai, O. Kikuchi, M. Umeda, S. Ohno, “Defect detection method using statistical image processing of scanning acoustic tomography”, Proceedings of 23th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA), pp. 293 - 296, 2016.
- [72] P. Dreher, R. Schmidt, A. Vetter, J. Hepp, A. Karl, G.J. Brabec, “Non-destructive imaging of defects in Ag-sinter die attach layers - A comparative study including X-ray, Scanning Acoustic Microscopy and Thermography”, Microelectronics Reliability, Vol. 88-90, pp. 365 - 370, 2018.
- [73] K. Nikawa, S. Tozaki, “Novel OBIC Observation Method for Detecting Defects in Al Stripes Under Current Stressing”, Proceedings of 19th ASM International Symposium for Testing and Failure Analysis (ISTFA), pp. 303 - 310, 1993.
- [74] K. Nikawa, C. Matsumoto, S. Inoue, “Novel Method for Defect Detection in AL Stripes by Means

- of Laser Beam Heating and Detection of Changes in Electrical Resistance”,
Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 34, pp. 2260 - 2265, 1995.
- [75] K. Nikawa, S. Inoue, “New Laser Beam Heating Methods Applicable to Fault Localization and Defect Detection in VLSI Devices”, Proceedings of 34th IEEE Reliability Physics Symposium (IRPS), pp. 346 - 354, 1996.
- [76] N. Kawamura, T. Sakai, M. Shimaya, “An Analysis of a Method of Enhancing the Intensity of OBIRCH Signal for Defects Observation in VLSI Metal Interconnections”,
IEICE TRANSACTIONS on Electronics, Vol. E77-C, pp. 579 - 584, 1994.
- [77] F. Beaudoin, X. Chauffleur, J.P. Fradin, P. Perdu, R. Desplats, D. Lewis, “Modeling Thermal Laser Stimulation”, Microelectronics Reliability, Vol. 41, pp. 1477 - 1482, 2001.
- [78] A. Reverdy, M. de la Bardonnie, P. Poirier, H. Murray, P. Perdu, A. Boukkali,
“Dynamic study of the thermal laser stimulation response on advanced technology structures”,
Microelectronics Reliability, Vol. 48, pp. 1689 - 1695, 2008.
- [79] T. Koyama, Y. Mashiko, M. Sekine, H. Koyama, K. Horie, “New non-bias optical beam induced current (NB-OBIC) technique for evaluations of Al interconnects”, Proceedings of IEEE International Reliability and Physics Symposium (IRPS), pp. 228 - 233, 1995.
- [80] F.J. Henly, “LOGIC FAILURE ANALYSIS OF CMOS VLSI USING A LASER PROBE”,
Proceedings of 22nd IEEE International Reliability and Physics Symposium (IRPS),
pp. 69 - 75, 1984.
- [81] K. Haraguchi, “Microscopic Optical Beam Induced Current Measurements and their Applications”, Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), pp. 653 - 659, 1994.
- [82] K. Nikawa, C. Matsumoto, S. Inoue, “Verification and Improvement of the Optical Beam Induced Resistance Change (OBIRCH) Method”, Proceedings of 20th ASM International Symposium for Testing and Failure Analysis (ISTFA), pp. 11 -16, 1994.
- [83] K. Nikawa, S. Inoue, “New Capabilities of OBIRCH Method for Fault Localization and Defect Detection”, Proceedings of 6th IEEE Asian Test Symposium (ATS), pp. 214 - 218, 1997.
- [84] Q. Wen, D.R. Clarke, “Imaging spatial variations in resistance along electrical conductors”,
Applied Physics Letters, Vol. 72, pp. 1920 - 1922, 1998.
- [85] K. Nikawa, T. Saiki, S. Inoue, M. Ohtsu, “Near-field-optical-probe induced resistance-change-detection (NF - OBIRCH) method for identifying defects in Al and TiSi interconnects”,
Microelectronics Reliability, Vol. 38, pp. 883 - 888, 1997.
- [86] K. Nikawa, T. Saiki, S. Inoue, M. Ohtsu, “Imagin of current paths and defects in Al and TiSi interconnects on ver-large-scale integrated-circuit chips using near-field optical-probe stimulation and resulting resistance change”, Applied Physics Letters, Vol. 74, pp. 1048 - 1050, 1999.

- [87] E.I. Cole Jr, P. Tangyunyong, D.L. Barton, "Backside localization of Open and Shorted IC Interconnection", Proceedings of 36th IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), pp. 129 - 136, 1998.
- [88] E.I. Cole Jr, P. Tangyunyong, D.L. Barton, "Local thermal probing to detect open and shorted IC interconnections", Microelectronics Reliability, Vol. 39, pp. 681 - 693, 1999.
- [89] K. Nikawa, S. Inoue, "Highly Sensitive OBIRCH System for Fault localization and Defect Detection", IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, Vol. E-81D, pp. 734 - 748, 1998.
- [90] R. Desplats, F. Beaudoin, P. Perdu, P. Poirier, D. Tremouilles, M. Baffleur, D. Lewis, "Backside localization of Current Leakage Faults Using Thermal Laser Stimulation", Microelectronics Reliability, Vol. 41, pp. 1539 - 1544, 2001.
- [91] F. Essely, F. Darracq, V. Pouget, M. Remmach, F. Beaudoin, N. Guitard, M. Baffleur, P. Perdu, A. Touboul, D. Lewis, "Application of various optical techniques for ESD defect localization", Microelectronics Reliability, Vol. 46, pp. 1563 - 1568, 2006.
- [92] J.Y. Liao, H.L. Marks, F. Beaudoin, "OBIRCH analysis of electrically stressed advanced graphic ICs", Microelectronics Reliability, Vol. 47, pp. 1565 -1568, 2007.
- [93] S.K. Braham, A. Glowacki, R. Leihkauf, C. Boit, "Laser induced impact ionization effect in MOSFET during 1064 nm laser stimulation", Microelectronics Reliability, Vol. 51, pp. 1652 - 1657, 2011.
- [94] Y. Mizusima, H. Kitada, K. Koshikawa, S. Suzuki, T. Nakamura, T. Ohba, "Novel Through Silicon Vias Leakage Current Evaluation Using Infrared-Optical Beam Irradiation", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 51, 05EE03, 2012.
- [95] N. Hozumi, R. Yamashita, C.K. Lee, M. Nagao, K. Kobayashi, Y. Saijo, M. Tanaka, N. Tanaka, S. Ohtsuki, "Ultrasonic sound speed microscope for biological tissue characterization driven by nanosecond pulse", Acoustical Science and Technology, Vol. 24, pp. 386 - 390, 2003.
- [96] N. Hozumi, R. Yamashita, C.K. Lee, M. Nagao, K. Kobayashi, Y. Saijo, M. Tanaka, N. Tanaka, S. Ohtsuki, "Time-frequency analysis for pulse driven ultrasonic microscopy for biological tissue characterization", Ultrasonics, Vol. 42, pp. 717 - 722, 2004.
- [97] A. Korpel, L.W. Kessler, P.R. Palermo, "Acoustic Microscope operating at 100 MHz", Nature, Vol. 232, pp. 110 - 111, 1971.
- [98] R.A. Lemons, C.F. Quate, "A Scanning Acoustic Microscope", Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), pp. 18 - 21, 1973.
- [99] R.N. Johnston, A. Atalar, J. Heiserman, V. Jipson, C.F. Quate, "Acoustic microscopy: Resolution of subcellular detail", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS), Vol. 76, pp. 3325 - 3329, 1979.

- [100] J.A. Hildebrand, D. Rugar, R.N. Johnston, C.F. Quate, "Acoustic microscopy of living cell", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS), Vol. 78, pp. 1656 - 1660, 1981.
- [101] Y. Saijo, M. Tanaka, H. Okawai, F. Dunn, "The ultrasonic properties of Gastric Cancer Tissues Obtained with a Scanning Acoustic Microscope System", Ultrasound in Medicine and Biology, Vol. 17, pp. 709 - 714, 1991.
- [102] N. Hozumi, A. Kimura, S. Terauchi, M. Nagao, S. Yoshida, K. Kobayashi, Y. Saijo, "Acoustic Impedance Micro-imaging for Biological Tissue Using a Focused Acoustic Pulse with a Frequency Range up to 100 MHz", Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), pp. 170 - 173, 2005.
- [103] N. Hozumi, S. Yoshida, K. Kobayashi, Y. Saijo, K. Miura, S. Yamamoto, "Observation of Rat Brain Tumor Model and Its Quantitative Analysis by Acoustic Impedance Microscopy", Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), pp. 2372 - 2375, 2012.
- [104] A.I. Gunawan, N. Hozumi, T. Furuhashi, S. Yoshida, "Projection Mode Ultrasonic Microscopy for Cell-size Observation", Proceedings of Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, pp. 884 - 887, 2013.
- [105] K. Kobayashi, S. Yoshida, Y. Saijo, N. Hozumi, "Acoustic impedance microscopy for biological tissue characterization", Ultrasonics, Vol. 54, pp. 1922 - 1928, 2014.
- [106] N. Hozumi, S. Kajima, A.I. Gunawan, S. Yoshida, "Viscoelastic Imaging Using Acoustic Impedance Microscope and Its Application to Biological Tissue", Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), pp. 1 - 4, 2015.
- [107] N. Hozumi, A. Nakano, S. Terauchi, M. Nagao, S. Yoshida, K. Kobayashi, S. Yamamoto, Y. Saijo, "Precise Calibration for Biological Acoustic Impedance Microscope", Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium (IUS), pp. 801 - 804, 2007.
- [108] N. Hozumi, A. Nakano, S. Terauchi, M. Nagao, S. Yoshida, K. Kobayashi, S. Yamamoto, Y. Saijo, "DEVELOPMENT OF BIOLOGICAL ACOUSTIC IMPEDANCE MICROSCOPE AND ITS ERROR ESTIMATION", Modern Physics Letters, Vol. 22, No. 11, pp. 1129 - 1134, 2008.
- [109] T. Uemura, T. Suzuki, K. Hanai, N. Hozumi, S. Yoshida, K. Kobayashi, S. Yamamoto, Y. Saijo, "Aberration Correction for Biological Acoustic Impedance Microscope", Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), pp. 1518 - 1521, 2009.
- [110] N. Hozumi, A.I. Gunawan, S. Kajima, S. Yoshida, Y. Saijo, K. Kobayashi, S. Yamamoto, "Sound Field Analysis for Biological Acoustic Impedance Microscope for Its Precise Calibration", Proceedings of Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, pp. 1212 - 1215, 2013.
- [111] A.I. Gunawan, N. Hozumi, S. Yoshida, Y. Saijo, K. Kobayashi, S. Kamamoto, "Numerical

- analysis of ultrasound propagation and reflection intensity for biological acoustic impedance microscope”, *Ultrasonics*, Vol. 61, pp. 79 - 87, 2015.
- [112] A.I. Gunawan, N. Hozumi, K. Takahashi, S. Yoshida, Y. Saijo, K. Kobayashi, S. Yamamoto, “Numerical analysis of acoustic impedance microscope utilizing acoustic lens transducer to examine cultured cells”, *Ultrasonics*, Vol. 63, pp. 102 - 110, 2015.
- [113] M. Omura, K. Yoshida, M. Kohta, T. Kubo, T. Ishiguro, K. Kobayashi, N. Hozumi, T. Yamaguchi, “Tissue characterization of skin ulcer for bacterial infection by multiple statistical analysis of echo amplitude envelope”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 55, 07KF14, 2016.
- [114] K. Takanashi, M. Washiya, K. Ota, S. Yoshida, N. Hozumi, K. Kobayashi, “Quantitative evaluation method for differentiation of C2C12 myoblasts by ultrasonics microscopy”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 56, 07JF11, 2017.
- [115] T.T.K. Soon, T.W. Chean, H. Yamada, K. Takahashi, N. Hozumi, Y. Yoshida, “Effect of anticancer drugs on glioma brain tumor model characterized by acoustic impedance microscopy”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 56, 07JF15, 2017.
- [116] R.H. Rahayu, K. Takanashi, T.T.K. Soon, I. Seviaryna, R. Maev, K. Kobayashi, N. Hozumi, S. Yoshida, “Reaction assessment of cultured breast cancer cells exposed to anticancer agents using microscale acoustic impedance profile”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 57, 07LF26, 2018.
- [117] T.W. Chean, N. Hozumi, S. Yoshida, K. Kobayashi, Y. Ogura, “Mutual conversion between B-mode image and acoustic impedance image”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 56, 07JF18, 2017.
- [118] N. Hozumi, N.D.B. Jalaluddin, T.T.K. Soon, T. Kawashima, Y. Murakami, S. Yoshida, K. Kobayashi, “Three-dimensional Acoustic Impedance Imaging for Cultured Biological Cells”, *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2018.
- [119] N. Hozumi, S. Yoshida, K. Kobayashi, “Three-dimensional acoustic impedance mapping of cultured biological cells”, *Ultrasonics*, Vol. 99, 105966, 2019.
- [120] E.B. Prastika, A. Imori, T. Kawashima, Y. Murakami, N. Hozumi, S. Yoshida, R. Nagaoka, K. Kobayashi, “Acoustic impedance interpretation of cross-sectional human skin by using time and frequency domain deconvolution”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 59, SKKB06, 2020.
- [121] E.B. Prastika, A. Imori, T. Kawashima, Y. Murakami, N. Hozumi, S. Yoshida, R. Nagaoka, K. Kobayashi, “Three-dimensional acoustic impedance mapping of human skin by improved time-frequency domain analysis”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 60, SDDE22, 2021.
- [122] E.B. Prastika, A. Imori, T. Kawashima, Y. Murakami, N. Hozumi, T.T.K. Soon, S. Yoshida,

- R. Nagaoka, K. Kobayashi, "Time and frequency domain deconvolution for cross-sectional cultured cell observation using an acoustic impedance microscopy", *Ultrasonics*, Vol. 119, 106601, 2022.
- [123] R. Nagaoka, H. Hasegawa, K. Tamura, S. Yoshida, N. Hozumi, K. Kobayashi, "Suppression of reflected signals from substrate as litters for cell measurements using acoustic impedance microscopy", *Ultrasonics*, Vol. 118, 106580, 2021.
- [124] W.J. Fry, F. Dunn, "Ultrasound: Analysis and experimental methods in biological research", *Physical Techniques in Biological Research*, Vol. 4, Academic Press, pp. 261 - 394, 1962.
- [125] H. Azhari, "Basics of Biomedical Ultrasound for Engineers", Wiley, p. 147, 2010.
- [126] 超音波便覧編集委員会, "超音波便覧", 丸善, p. 729, 1999.
- [127] J.W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics 3rd (邦訳)", 森北出版, pp. 76 - 77, 2012.
- [128] 橋本祐介, 明石尚之, 櫛引淳一, "VHF/UHF 帯における水の超音波減衰係数の測定", *電子情報通信学会技術研究報告*, US97-50, pp. 37 - 42, 1997.
- [129] L.F. Shampine, M.W. Reichelt, "THE MATLAB ODE SUITE", *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Scientific Computing*, Vol. 18, pp. 1 - 22, 1997.
- [130] E.A. Celaya, J.J.A. Aguirrezabala, P. Chatzipantelidis, "Implementation of an Adaptive BDF2 Formula and Comparison with the MATLAB Ode15s", *Procedia Computational Science*, Vol. 29, pp. 1014 - 1026, 2014.
- [131] G. Mie, "Beitraege zur Optik trueber Medien, spezielle kolloidaler Metalloesungen", *Annalen der Physik*, Vol. 25, pp. 377 - 445, 1908.
- [132] M. Born, E. wolf, "Principles of Optics 6th", Pergamon Press, pp. 645 - 653, 1980.
- [133] B.R. Tittmann, C. Miyasaka, E. Maeva, D. Shum, "Advanced in Acoustic Microscope and High Resolution Imaging", Wiley-VCH, pp. 155 - 158, 2013.
- [134] T. Matsumoto, N. Hozumi, "Resistance change observation of wiring in semiconductor device using ultrasonic stimulation", *Proceedings of 25th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA)*, 2018.
- [135] 松本徹, 穂積直裕, "超音波刺激によるパッケージ内配線の電流変動観察", *Proceedings of The 36th NANO Testing Symposium (NANOTS2016)*, pp. 225 - 238, 2016.
- [136] T. Matsumoto, N. Hozumi, "Application to a failure analysis of ultrasonic beam induced resistance change (SOBIRCH)", *Proceedings of 24th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA)*, 2017.
- [137] 松本徹, 江浦茂, 伊藤能弘, 松井拓人, 穂積直裕, "SOBIRCH のパッケージ故障解析への適用", *Proceedings of The 38th NANO Testing Symposium (NANOTS2018)*, pp. 7 - 12, 2018.
- [138] C.L. Henderson, "Failure analysis techniques for a 3D world", *Microelectronics Reliability*, Vol. 53, pp. 11171 - 11178, 2013.

- [139] F. Altmann, S. Brand, M. Petzold, "Failure Analysis Techniques for 3D Packages", Proceedings of 25th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA), 2018.
- [140] C. Uhrenfeldt, S. Munk-Nielsen, S. Beskowski, "Frequency domain scanning acoustic microscopy for power electronics Physics-based feature identified and selectivity", *Microelectronics Reliability*, Vol. 88 - 90, pp. 726 - 732, 2018.
- [141] H. Mitsuta, K. Sakai, "High Sensitivity Ultrasonic Inspection Technique Using Pulse Compression Method", Proceedings of 25th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA), 2018.
- [142] H. Mitsuta, K. Sakai, "High sensitivity detection of ultrasonic signal for nondestructive inspection using pulse compression method", *Microelectronics Reliability*, Vol. 92, pp. 172 - 178, 2019.
- [143] G. Kumar, T. Bandyopadhyay, V. Sukumaran, V. Sundaram, S.K. Lim, R. Tummala, "Ultra-high I/O Density glass/silicon interposers for high band with smart mobile applications", Proceedings of 61st IEEE Electronics Components and Technology Conference (ECTC), 2011.

謝辞

本研究の遂行および本論文の作成にあたり、直面する問題への対処法や研究の進め方、学会発表、論文執筆など終始適切かつ絶え間ない御指導、御鞭撻を頂いた

豊橋技術科学大学 教授 工学博士 穂積 直裕 先生

に深く感謝いたします。

本論文の作成にあたり、重要な助言を賜り、提案手法の応用面などで重要な御討論を頂いた

豊橋技術科学大学 教授 博士(工学) 滝川 浩史 先生
豊橋技術科学大学 教授 工学博士 若原 昭浩 先生

に厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、有意義な御指導及び御助力を頂いた

豊橋技術科学大学 准教授 博士(工学) 村上 義信 先生
豊橋技術科学大学 助教 博士(工学) 川島 朋裕 先生

ならびに研究に関し御助言や御協力、試料提供等でお力添え頂いた

浜松ホトニクス株式会社 松本 徹 氏
浜松ホトニクス株式会社 江浦 茂 氏
浜松ホトニクス株式会社 大高 章弘 氏
浜松ホトニクス株式会社 博士(工学) 茅根 慎通 氏

に深く御礼申し上げます。

超音波の応用技術に関し、有益な御討論を頂いた

豊橋技術科学大学 講師 薬学博士 吉田 祥子 先生

ならびに超音波に関する深い知見と研究に関する御助言、研究への応援を頂いた

本多電子株式会社 博士(医工学) 小林 和人 氏
本多電子株式会社 新井 均 氏
本多電子株式会社 博士(工学) 岡田 長也 氏
本多電子株式会社 流田 賢治 氏
本多電子株式会社 川口 祐季 氏

先輩として学位論文の執筆にお力添え頂いた、

浜松医科大学 助教 博士(工学) 田村 和輝 先生
Singapore Eye Research Institute (SERI) 博士(工学) 伊藤 一陽 先生

に厚く御礼申し上げます。

研究業績

本研究で得られた学位審査のための業績と本学位論文の本論の第4章から第6章までの対応を示す。それぞれの番号は、以下の業績集と対応している。

第4章 学術論文 1 (2017)

第5章 学術論文 2 (2019), 学術論文 3 (2020), 学術論文 4 (2020), 国際学会 1 (2019)

第6章 国際学会 2 (2020)

学術論文

No.	論文題目	掲載誌	著者
1	Nondestructive fault localization of IC interconnection by using ultrasonic heating	Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 56, 07JC11, 2017 (6 pages)	Takuto Matsui , Naohiro Hozumi, Akihiro Otaka, Toru Matsumoto
2	Ultrasonic beam induced resistance change (SOBIRCH) method for failure analysis of semiconductor devices encapsulated by mold resin	Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 58, SGGB03, 2019 (6 pages)	Takuto Matsui , Kosuke Tatsumi, Tomohiro Kawashima, Yoshinobu Murakami, Naohiro Hozumi, Sigeru Eura, Toru Matsumoto
3	Sensitivity improvement of ultrasonic beam induced resistance change (SOBIRCH) method with ultrasound resonance inside mold resin	Microelectronics Reliability, Vol. 109, 113641, 2020 (9 pages)	Takuto Matsui , Kosuke Tatsumi, Tomohiro Kawashima, Yoshinobu Murakami, Naohiro Hozumi, Sigeru Eura, Toru Matsumoto
4	Frequency determination in nondestructive test of semiconductor devices with ultrasound heating	Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 59, SKKB07, 2020 (8 pages)	Takuto Matsui , Kosuke Tatsumi, Tomohiro Kawashima, Yoshinobu Murakami, Naohiro Hozumi, Toru Matsumoto

国際学会

No.	論文題目	発表学会	著者
1	Improvement of sensitivity of ultrasonic beam induced resistance change (SOBIRCH) method with ultrasound resonance in mold resin	The 26th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA), 261 (2019.07) (5 pages)	Takuto Matsui , Kosuke Tatsumi, Tomohiro Kawashima, Yoshinobu Murakami, Naohiro Hozumi, Sigeru Eura, Toru Matsumoto
2	Nondestructive Fault Localization of Semiconductor Devices with Ultrasound Heating	The 9th International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), VH-4, pp. 470 - 473 (2020.09)	Takuto Matsui , Hayato Hayahi, Tomohiro Kawashima, Yoshinobu Murakami, Naohiro Hozumi, Sigeru Eura, Toru Matsumoto

国内学会

No.	論文題目	発表学会	著者
1	超音波による 半導体デバイス 非破壊故障解析法	平成 28 年度 電気学会全国大会, No. 1-034, p. 45 (2016.03)	松井拓人, 穂積直裕, 大高章弘, 松本徹
2	超音波による 局所加熱を利用した 電子デバイスの故障解析の 基礎検討	第 47 回 電気電子絶縁材料 システムシンポジウム, No. MVP-27, pp. 244 - 245 (2016.09)	松井拓人, 穂積直裕, 大高章弘, 松本徹
3	Nondestructive Failure Analysis Technique for IC interconnection by using Ultrasound Heating	The 37th Symposium on UltraSonic Electronics (USE2018), No. 3E2-2 (2016.11) (2 pages)	Takuto Matsui , Naohiro Hozumi, Akihiro Otaka, Toru Matsumoto
4	IC 用 超音波非破壊故障解析法の 充填剤の影響	平成 29 年度 電気学会全国大会, No. 1-047, p. 58 (2017.03)	松井拓人, 穂積直裕, 大高章弘, 松本徹
5	超音波を用いた IC 用非破壊故障解析法の 信号強度と樹脂厚の関係	第 49 回 電気電子絶縁材料 システムシンポジウム, No. MVP-19, pp. 225 - 226 (2018.09)	辰巳功祐, 松井拓人, 川島朋裕, 村上義信, 穂積直裕, 松本徹

国内学会

No.	論文題目	発表学会	著者
6	Analysis of sound and temperature fields in ultrasonic beam induced resistance change (SOBIRCH) method aiming to failure analysis for semiconductor devices	The 39th Symposium on UltraSonic Electronics (USE2018), No. 1J2-3 (2018.10) (2 pages)	Takuto Matsui , Kosuke Tatsumi, Tomohiro Kawashima, Yoshinobu Murakami, Naohiro Hozumi, Sigeru Eura, Toru Matsumoto
7	SOBIRCH の パッケージ故障解析への適用	第 38 回 ナノテストニング シンポジウム (NANOTS2018), pp. 7 - 12 (2018.11)	松本徹, 江浦茂, 伊藤能弘, <u>松井拓人</u> , 穂積直裕
8	Frequency determination in nondestructive test of semiconductor devices with ultrasound heating	The 40th Symposium on UltraSonic Electronics (USE2019), No. 3P2-14 (2019.11) (2 pages)	Takuto Matsui , Kosuke Tatsumi, Tomohiro Kawashima, Yoshinobu Murakami, Naohiro Hozumi, Toru Matsumoto
9	Nondestructive fault localization of multilayered semiconductor devices with frequency dependent ultrasound heating	The 41st Symposium on UltraSonic Electronics (USE2020), No. 3Pa2-4 (2020.11) (2 pages)	Takuto Matsui , Shunya Hayashi, Tomohiro Kawashima, Yoshinobu Murakami, Naohiro Hozumi, Toru Matsumoto
10	集束超音波による発熱を利用した積層構造半導体デバイスの故障解析法における最適周波数条件の検討	令和 3 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 2-C-p1-4, p. 1 (2021.09)	林隼也, <u>松井拓人</u> , 川島朋裕, 村上義信, 穂積直裕, 松本徹
11	集束超音波による発熱を利用した積層構造半導体デバイスの故障解析法において振動子-試料間距離が信号強度に与える影響	令和 3 年度 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, C4-8 (2021.09) (1 page)	林隼也, <u>松井拓人</u> , 川島朋裕, 村上義信, 穂積直裕, 松本徹

受賞

No.	賞名	表彰団体名	発表題目, 受賞年月
1	優秀発表賞	第 47 回 電気電子絶縁材料 システムシンポジウム	超音波による局所加熱を利用した 電子デバイスの故障解析の基礎検討, (2016.09)
2	Presentation Award	The 9th International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)	Nondestructive Fault Localization of Semiconductor Devices with Ultrasound Heating, (2020.09)
3	Student Best Paper Presentation Award	2020 IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society (DEIS) Japan Chapter	Nondestructive Fault Localization of Semiconductor Devices with Ultrasound Heating, (2021.03)