

June 20, 2022

移動体通信用弾性波デバイスの 現状と将来

— 何故アナログ？ 何故個別部品？ —

橋本研也（電子科技大学）

k.hashimoto@ieee.org

講演内容

1. 自己紹介
2. 移動体通信器用弾性波デバイスとは？
3. 黎明期(1980年代)
TV-IF SAW市場の立ち上がり、RF SAW素子の提案
4. 展開期(1990年代)
RF SAW市場立ち上がり
5. 混乱期(2000年代)
BAW市場立ち上がり
TC SAW/BAW技術の開発
6. 成長期(2010年代)
SAW/BAW市場の急拡大
7. 今後の展望
8. まとめ

講演内容

1. 自己紹介

学歴

千葉大学工学部卒業 1978年

千葉大学大学院工学研究科修了 1980年

東京工業大学 工学博士 1989年

職歴

千葉大学助手 1980年

千葉大学助教授 1991年

千葉大学教授 2005年

千葉大学先進科学センター長 2013-2015年

千葉大学定年退職 2021年

電子科技大学教授 2021年

人生の7割近く千葉大西千葉キャンパス内を徘徊

大学時代はバンド活動に集中！

軽音楽部卒 4年で卒業できたら神童

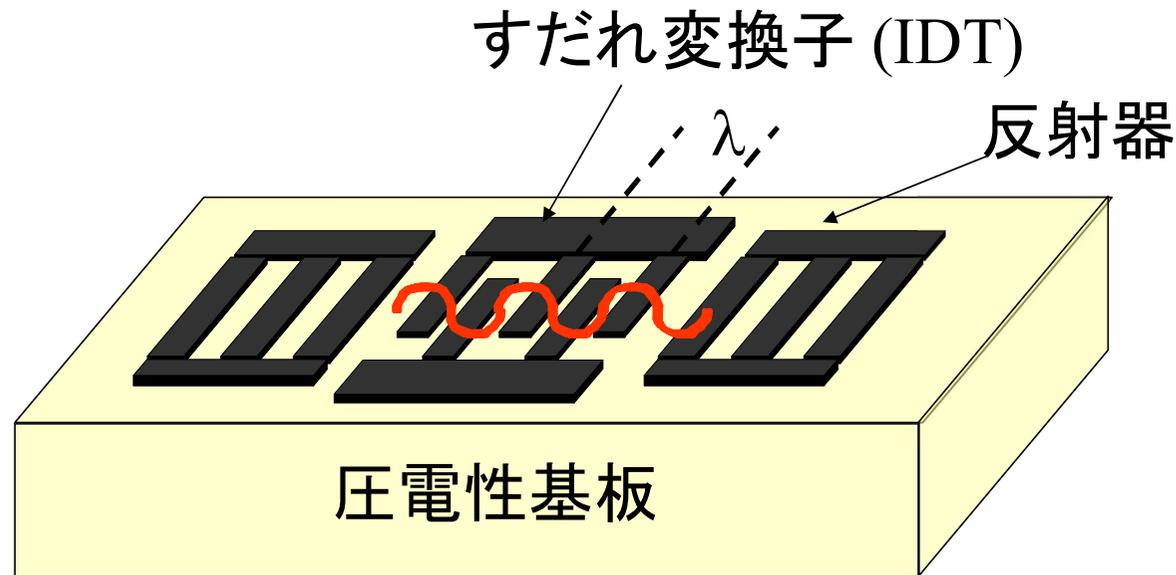


自己評価最高のライブで聴衆
から最悪の評価(3年次末)



アホらしくなり
無事完全引退

卒論テーマ：弾性表面波素子



なぜこれ？ 答え：たまたま（残ったテーマ）

研究が面白い！

⇒大学院受験にむけて突然猛勉強

なぜ大学に残ったのか？

答え：研究が面白いから。

学生はお客様、助手(今の助教)は下僕。。。

人生の目標：頭にきていつ辞表叩きつけても、
直ぐにヘッドハントされる人材になること。

何故中国へ？

1. 自分で優秀な博士学生を取れないから
2. 自分で自分を雇えないから
3. 産業界から一社に囲われぬ様依頼

何故電子科技大へ？

1. 電子通信領域で一位評価(中国教育部)
2. これまでも優秀な学生を派遣
3. 学生の多くが研究者・エンジニア志望
4. 大学当局からも感謝・全面的な支援

講演内容

2. 移動体通信器用弾性波デバイスとは？

高周波弾性波共振子

すだれ変換子 (IDT)

反射器

λ



圧電薄膜 (AlN)

共振子

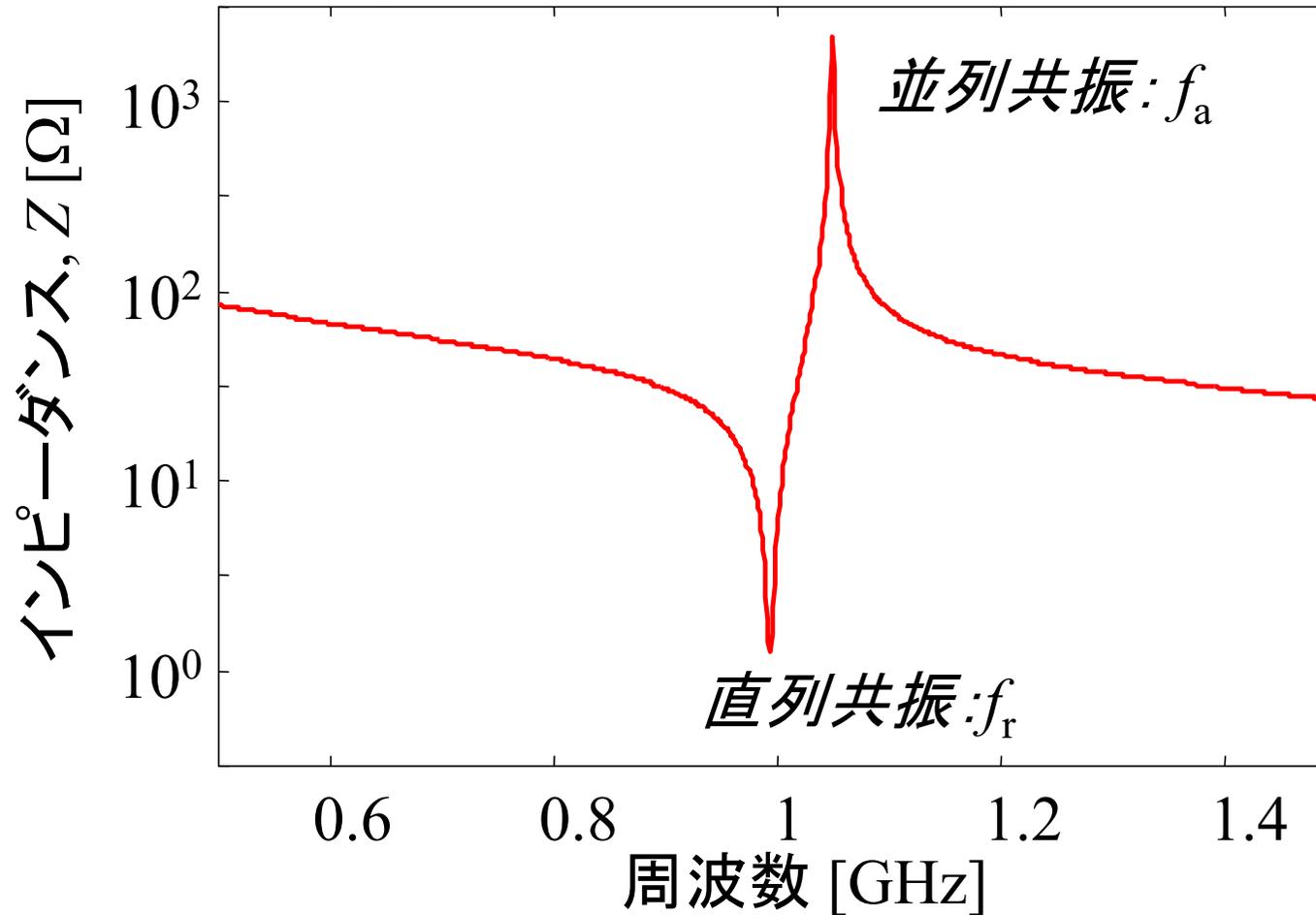


弾性表面波 (SAW) 共振子

バルク波 (BAW) 共振子

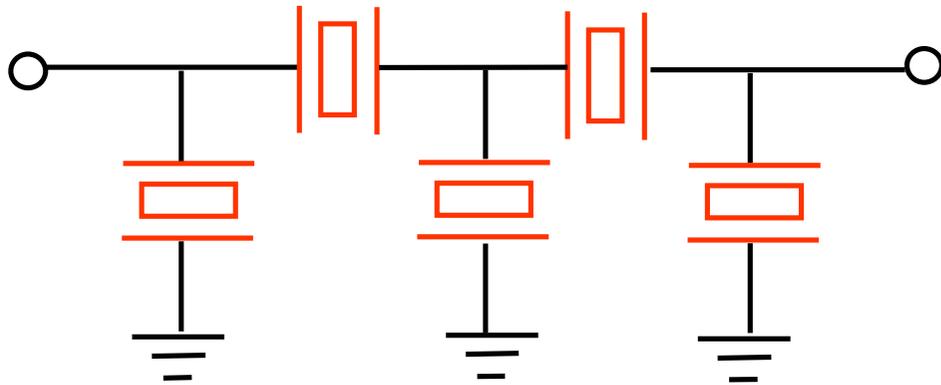
- 圧電性により機械共振を電氣的共振に変換
- 弾性振動 = 高Q、音速 $\sim 10^{-4}$ * 光速 \Rightarrow 小型、軽量

共振特性



$f_a - f_r$: フィルタの帯域幅を決定 (圧電性の強さが支配)
 f_a, f_r での Z の比 : フィルタの損失を決定

共振子の縦続接続＝ラダーフィルタ

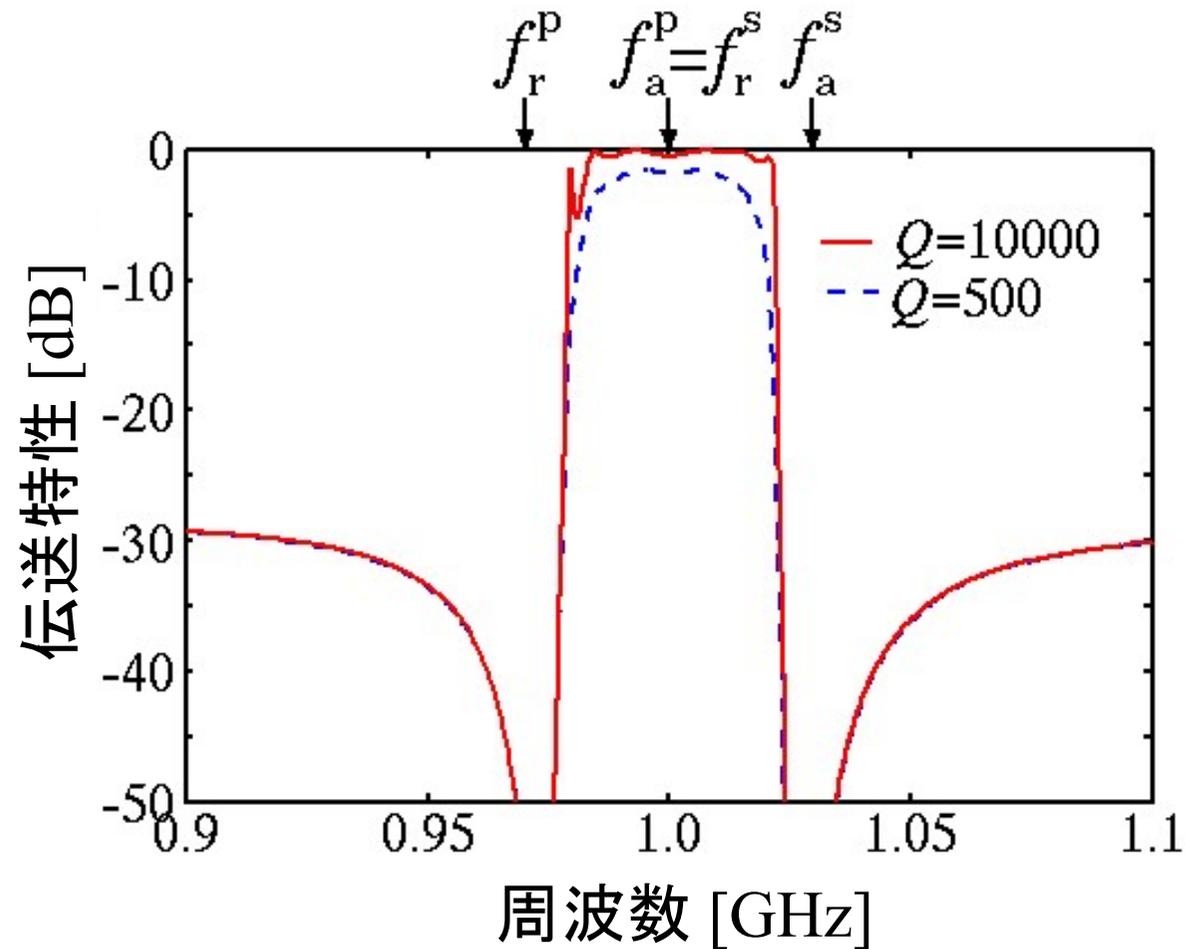


市販チップの写真例

Source: SystemPlus Consulting,
SAW Filters Comparison 2020

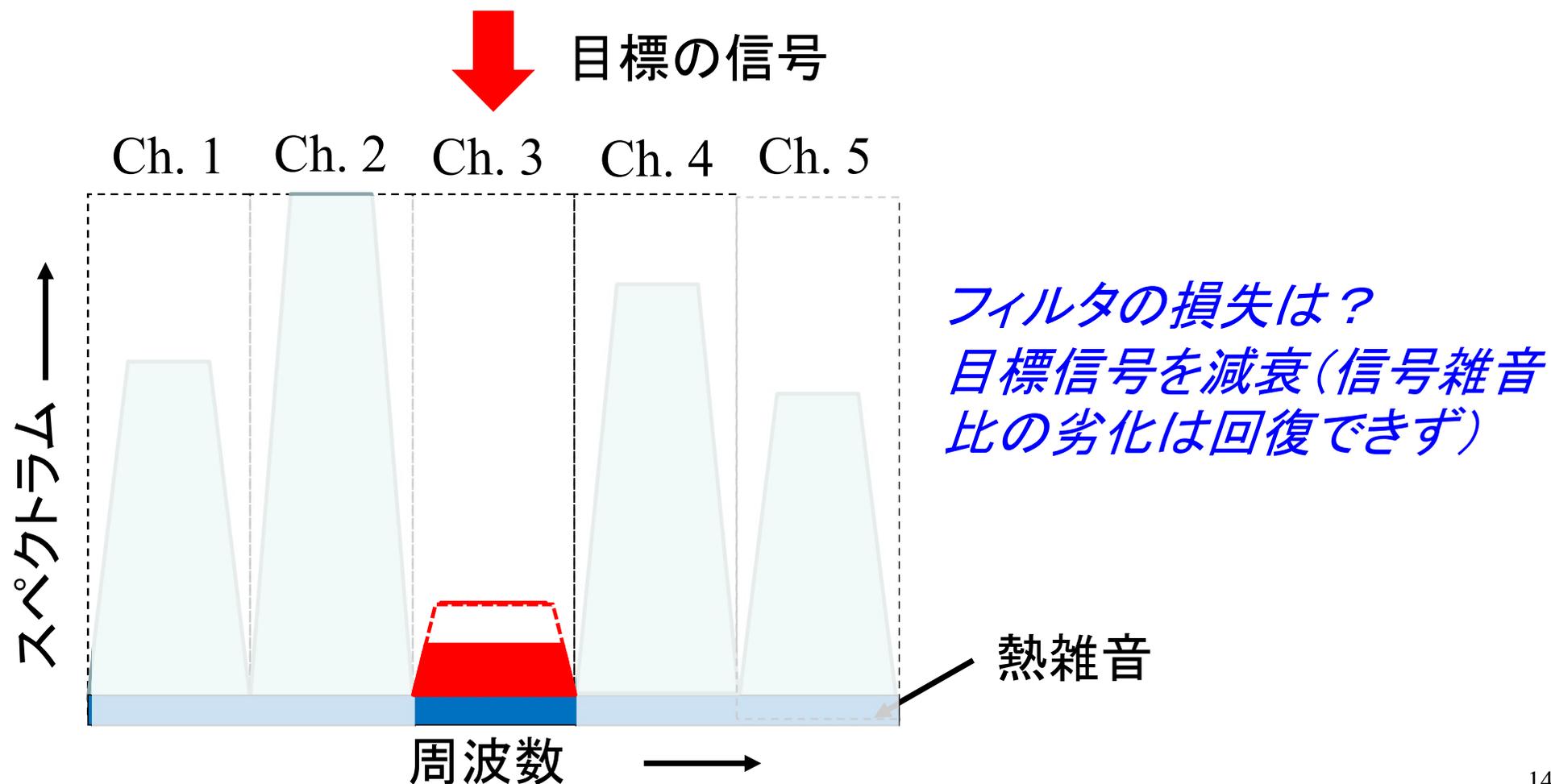


何故高い Q が必要？

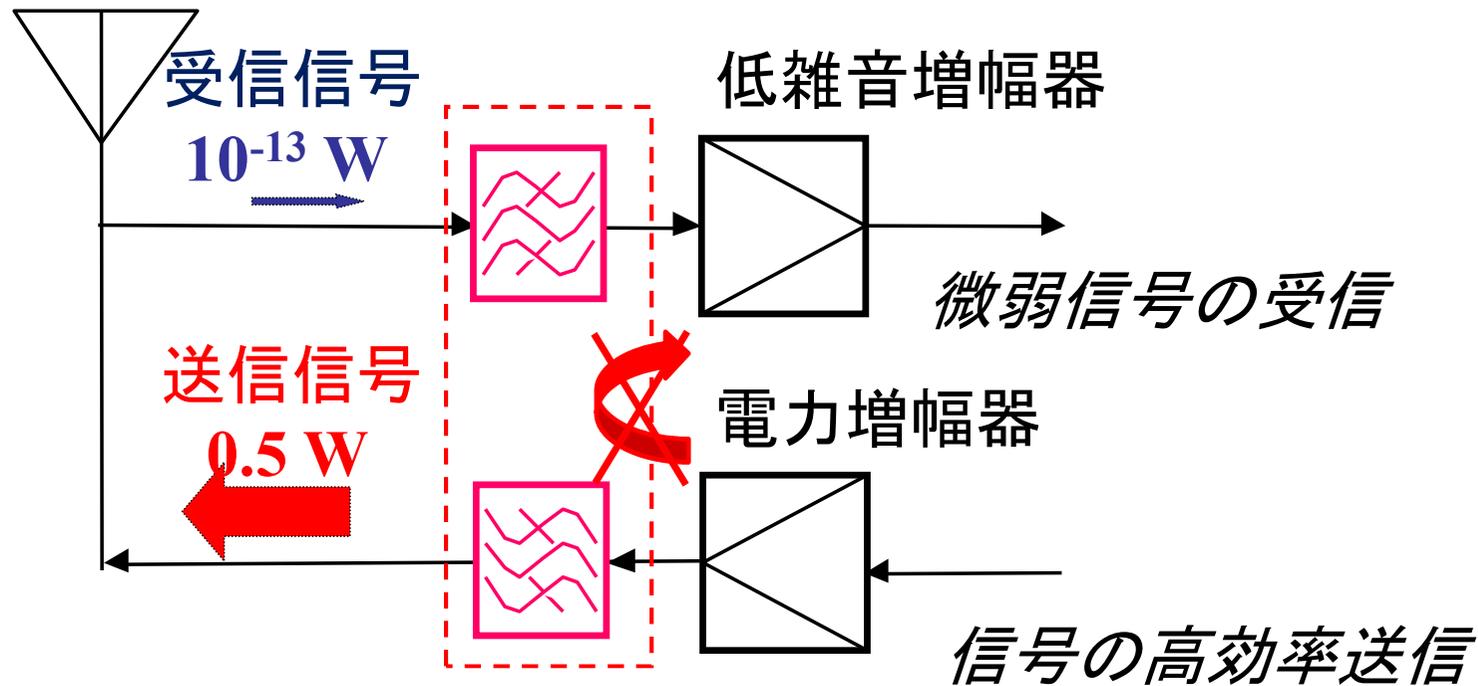


Q が損失と通過域
端の急峻さを支配

高周波フィルタの役割



携帯電話(FDD)におけるエアインターフェース



Tx->Rx漏れの除去=アンテナ共用器(Duplexer)

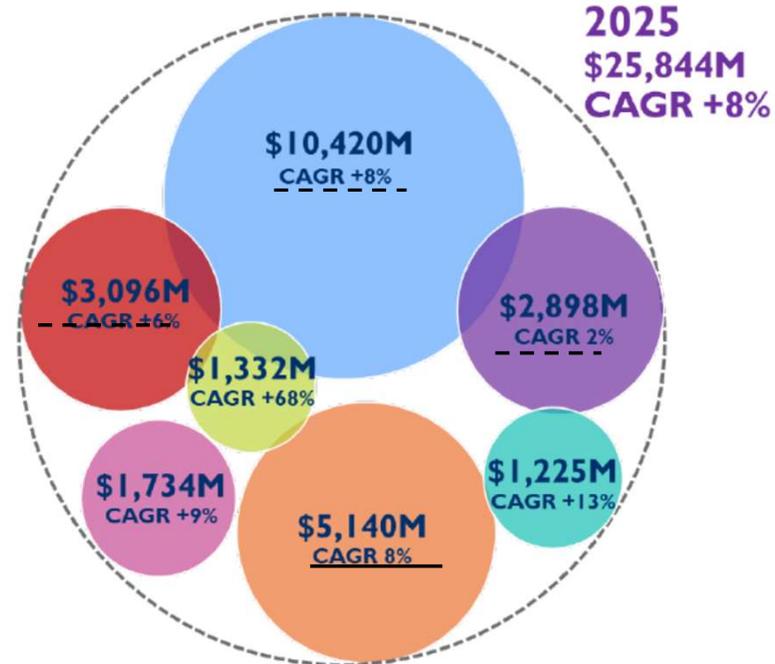
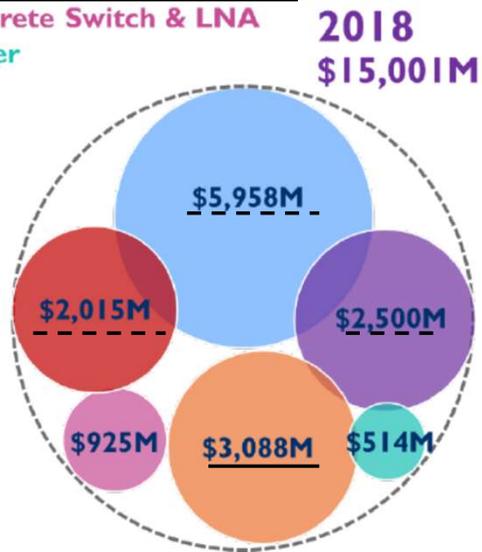
市場規模は？

RF Front End & Connectivity Market Forecast



-- TAM Modules & RF components for Front End and Connectivity

- PA module
- Receive module
- Wi-Fi & connectivity module
- AiP module
- Discrete Filter, Duplexer,...
- Discrete Switch & LNA
- Tuner

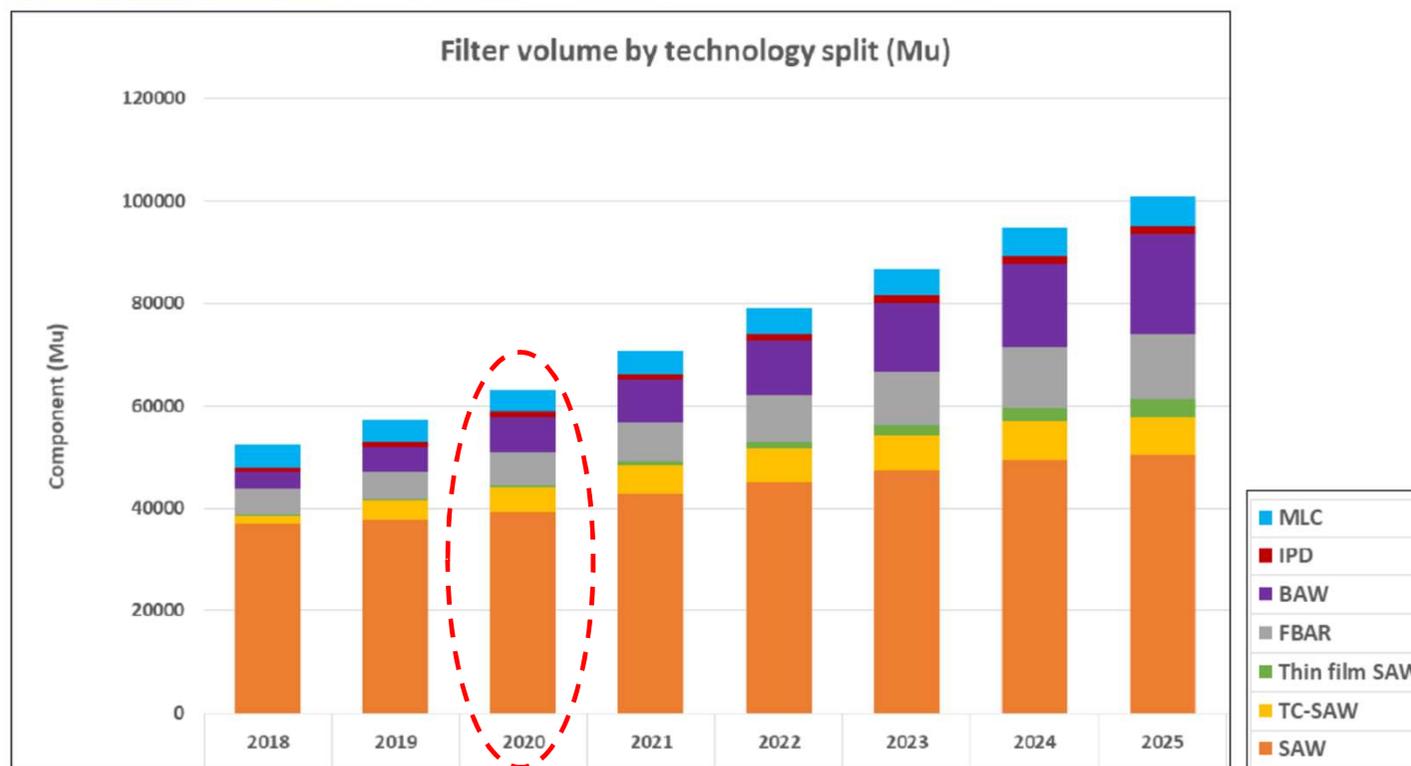


- RF module market represented 70% of the TAM in 2018.
- By 2025, we expect almost the same proportion as RF discrete market will remain strong with a demand from Chinese OEMs.

Source: SystemPlus Consulting, SAW Filters Comparison 2020

何故その様に活況？

RF Filter technology Market Forecast

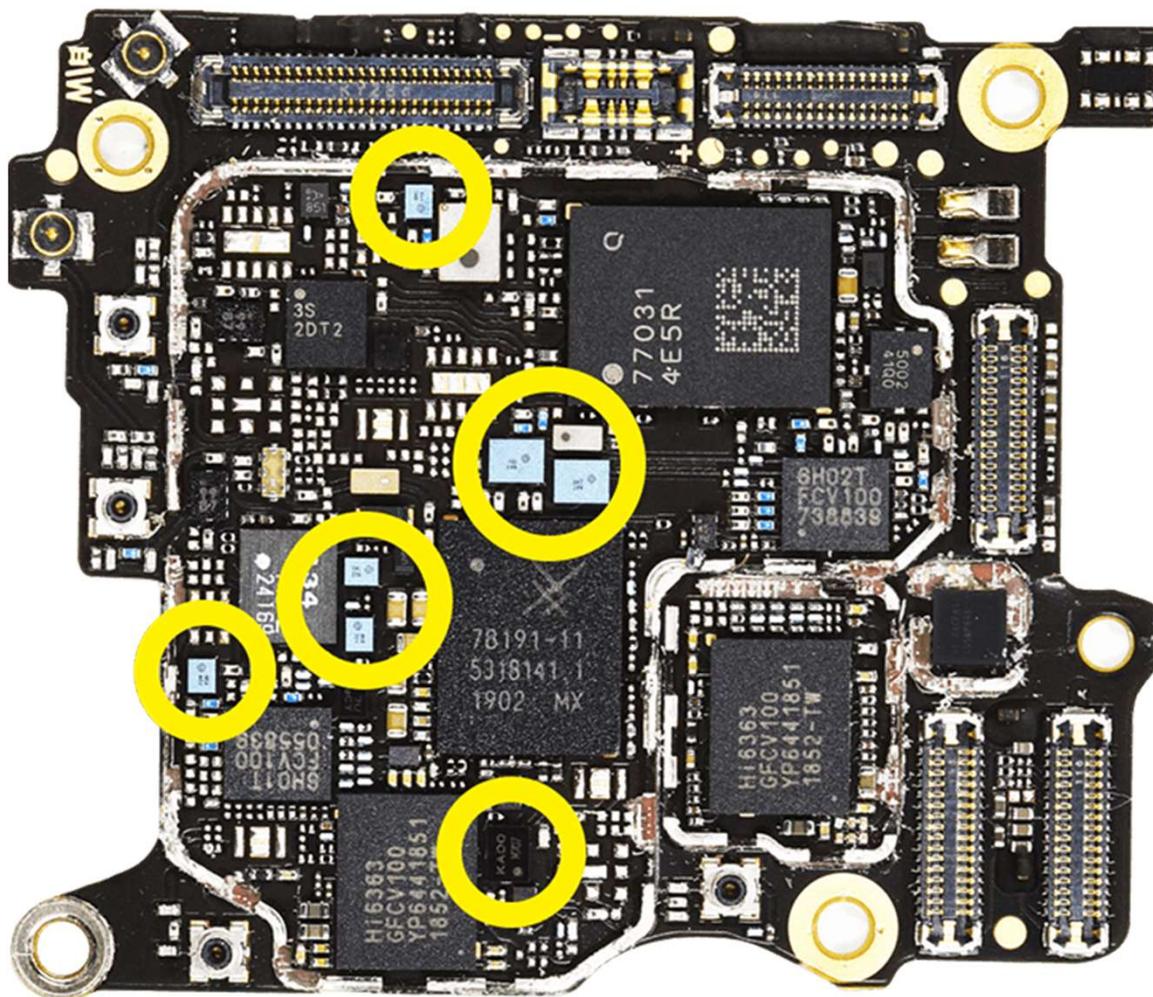


一つのスマホに数多くのSAW/BAW素子が実装！

2020年で搭載SAW/BAWデバイス数 一台平均40個

Source: SystemPlus Consulting, SAW Filters Comparison 2020

Huawei P30Pro内の弾性波フィルタとアンテナ共用器



世界中の通信帯域と通信方式に対応 ⇒
数多くの受信機と数多くのフィルタを実装

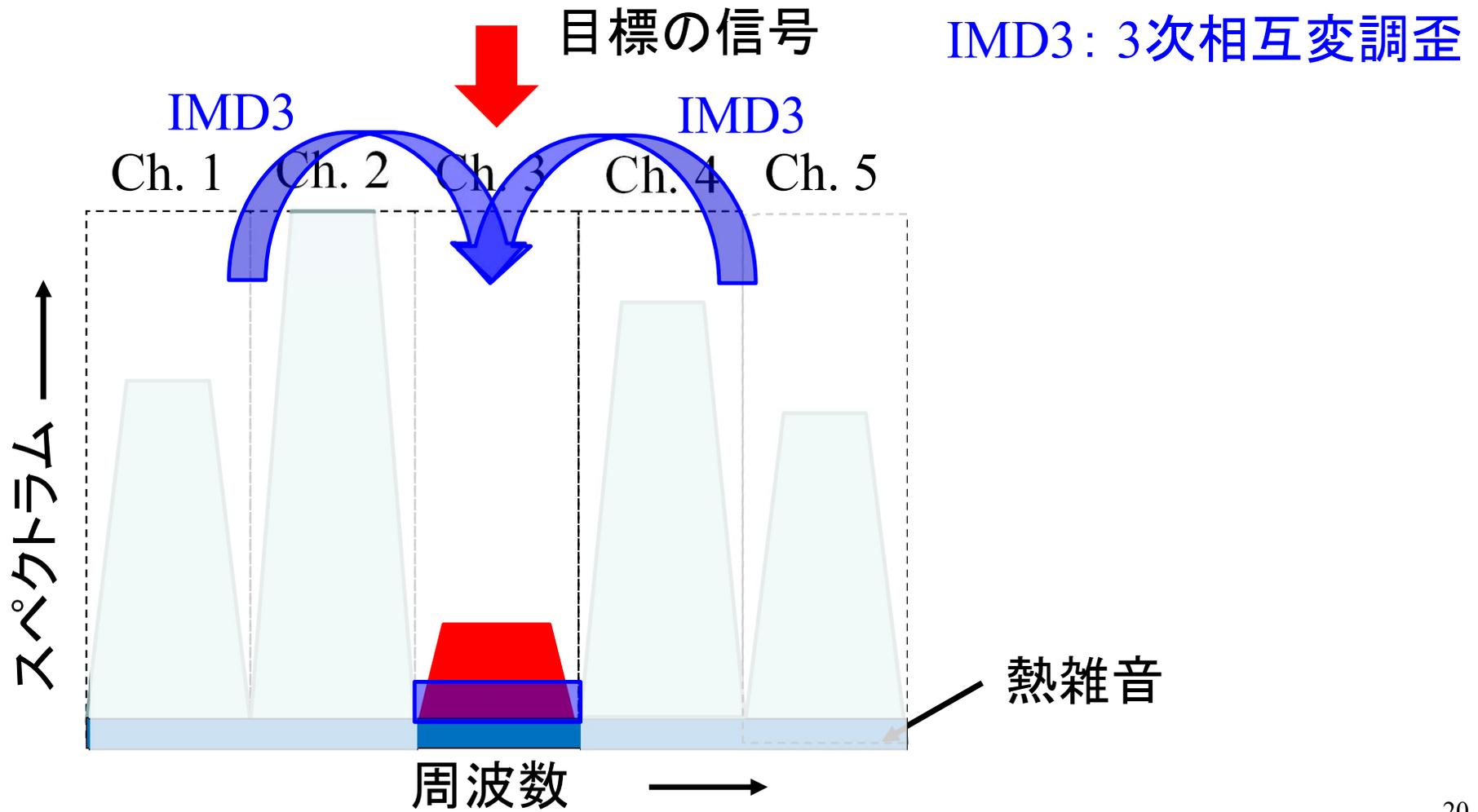
何故弾性波デバイス？

RFフィルタへの要求

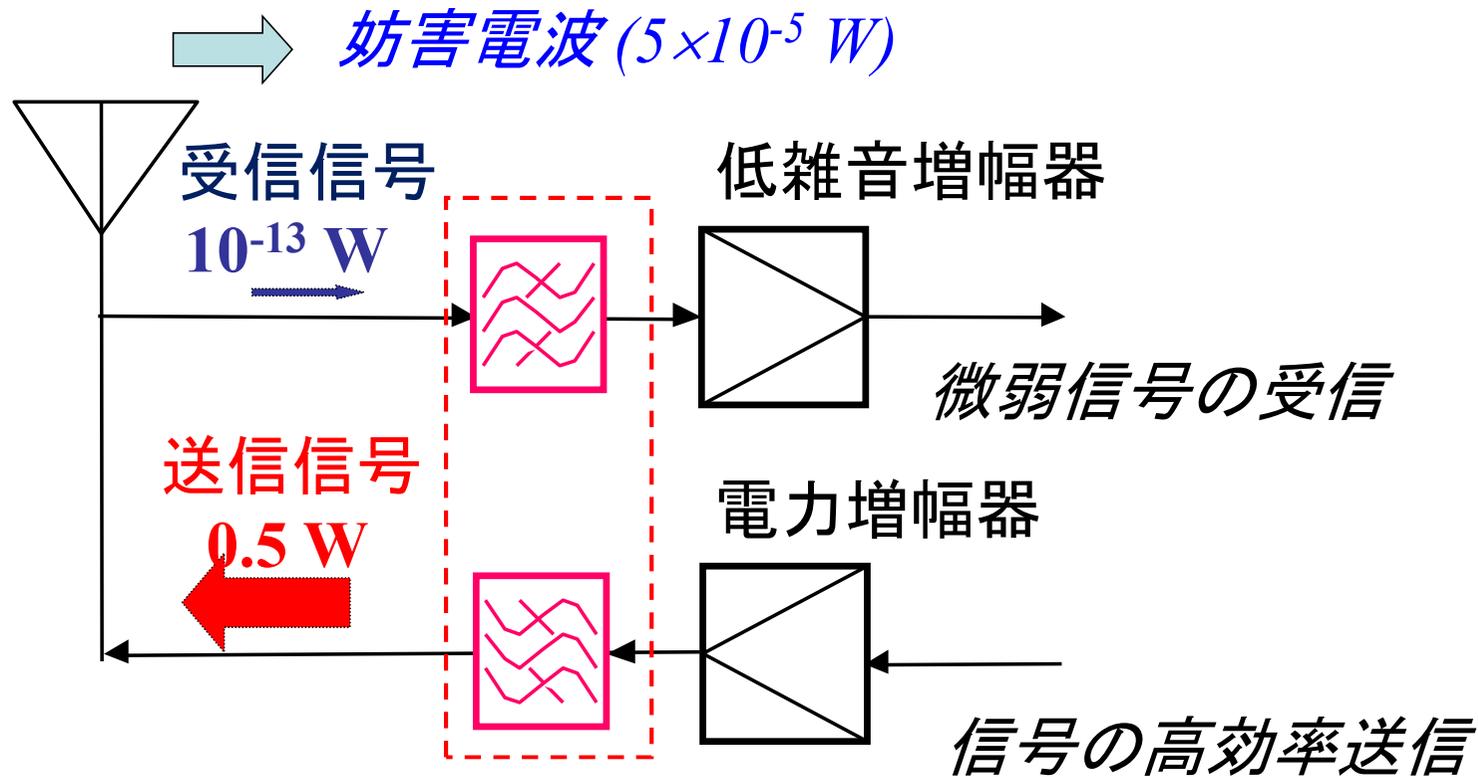
- 低挿入損失
- 急峻な遮断特性
- 高い帯域外抑圧比
- 良好な温度安定性
- 弱い非線形性
- 小型・低背・軽量
- 耐電力性
- 低価格 等等

世の中は要求を満足すれば技術の詳細は不問

高周波フィルタの役割

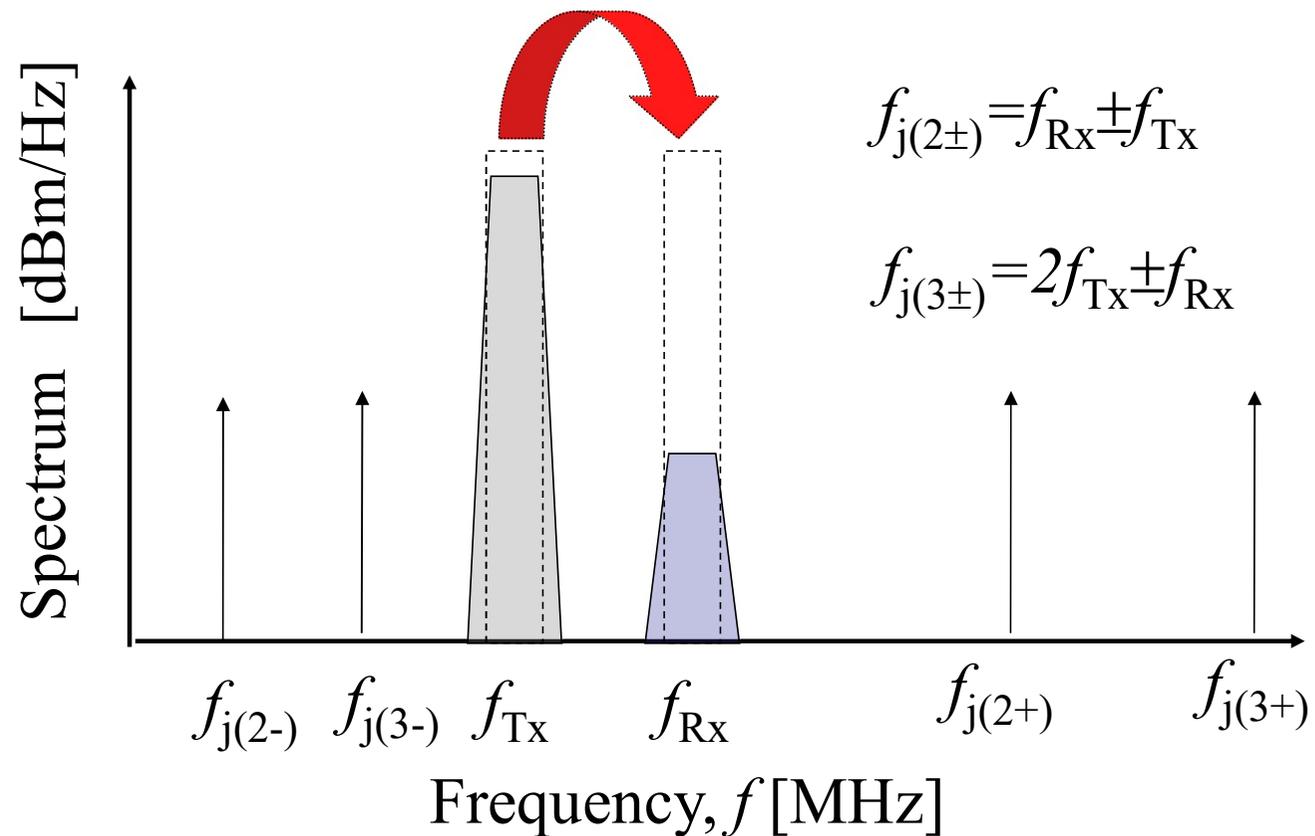


携帯電話 (FDD) におけるエアインターフェース



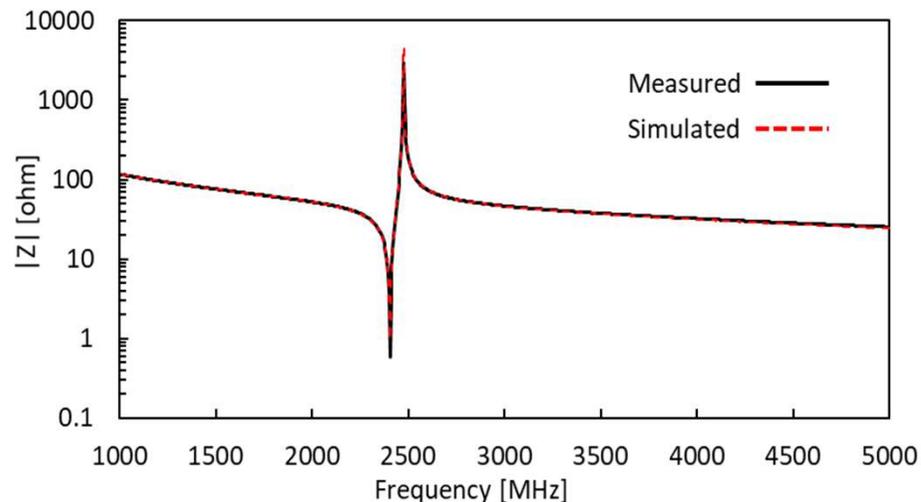
Tx->Rx漏れの除去=アンテナ共用器 (Duplexer)

外来信号とTx信号との混合

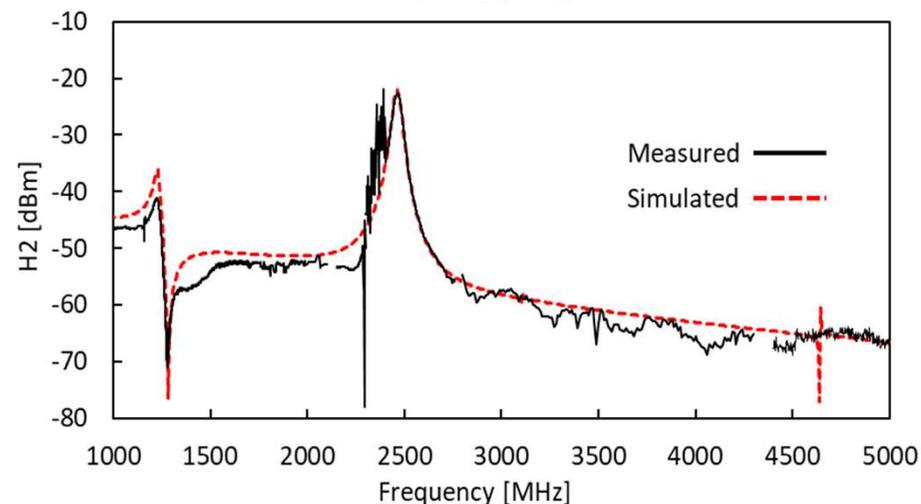


徹底したTx信号漏洩の抑圧が必要

SAW/BAWデバイス自体も非線形性信号発生！



BAW共振子の線形応答

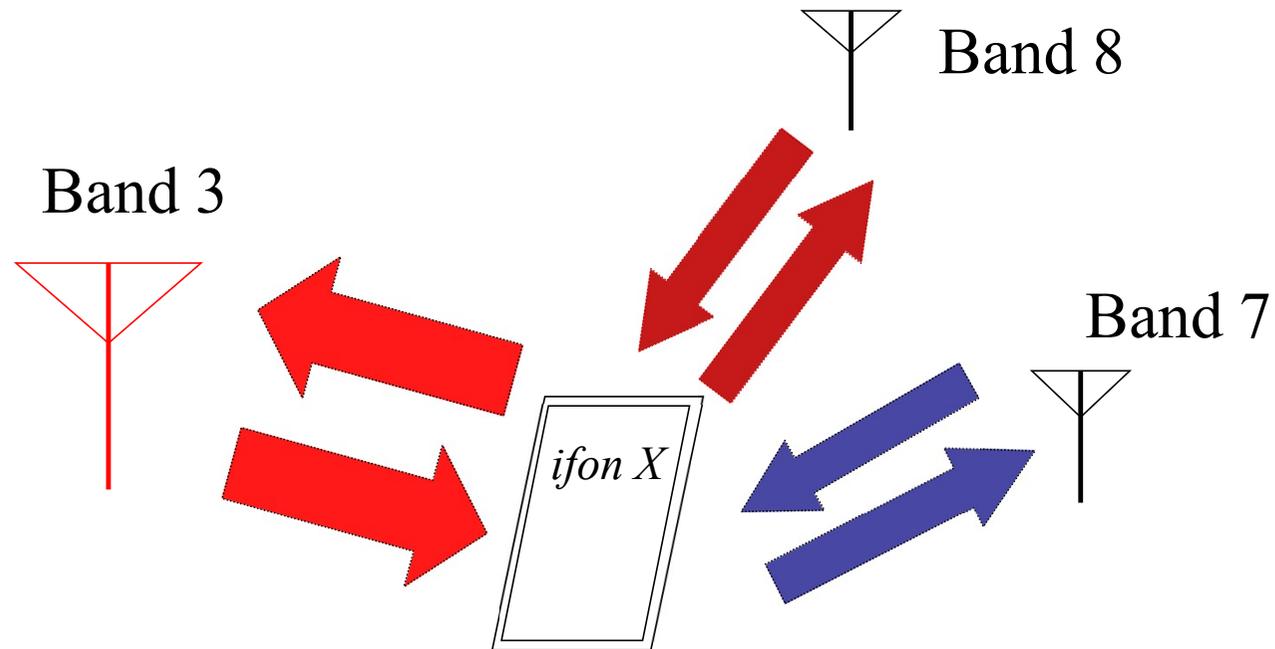


BAW共振子のH2応答

弱いが無視できず。。

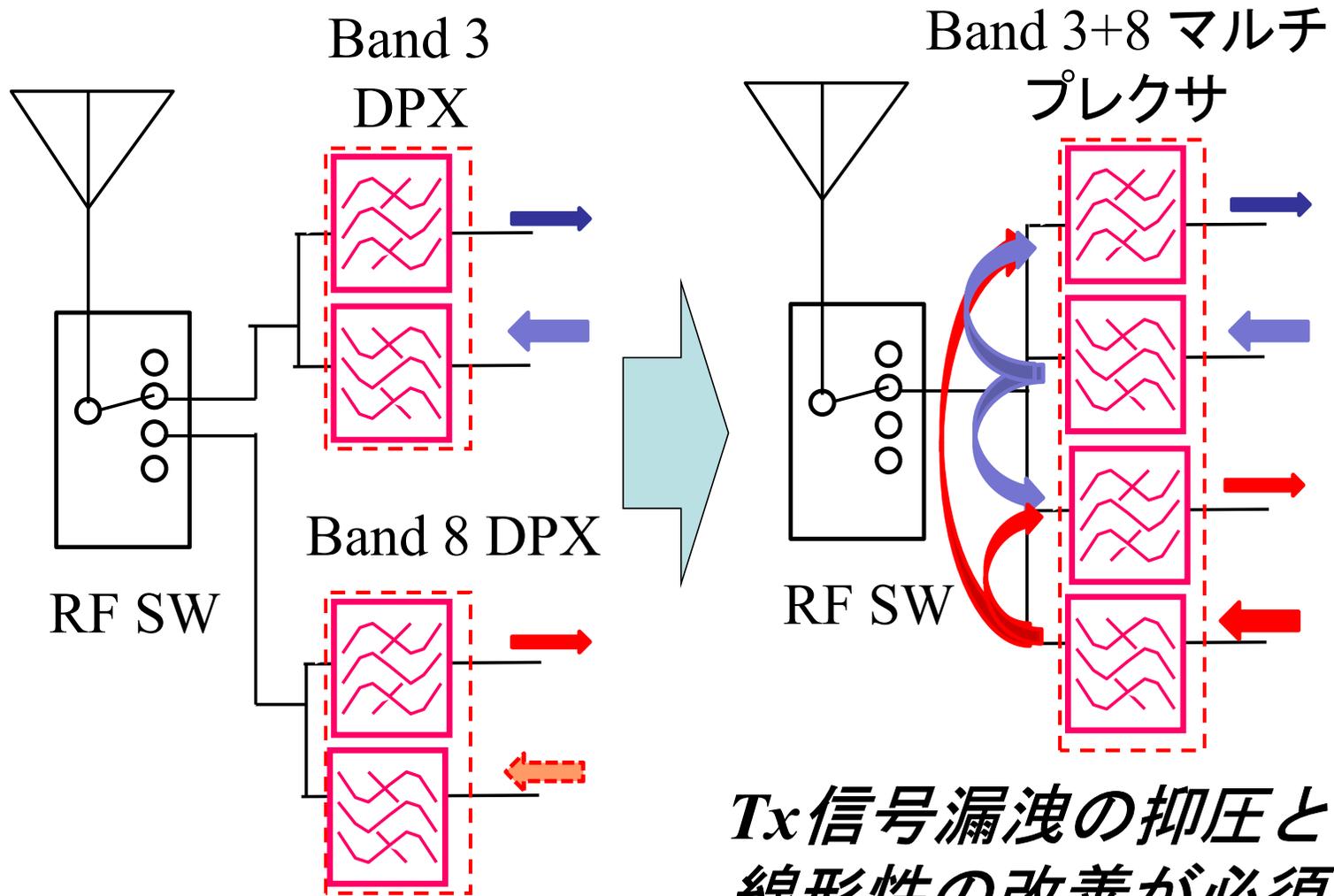
T.Irieda, T.Nishizawa, S.Taniguchi, M.Ueda, and K.Hashimoto, "Second-order Nonlinearity of Amorphous SiOF Films in FBARs," Proc. IEEE Ultrason. Symp. (2021) [10.1109/IUS52206.2021.9593709](https://doi.org/10.1109/IUS52206.2021.9593709)

Carrier Aggregation (CA)



データ転送の加速

Inter-Band CA用フロントエンド



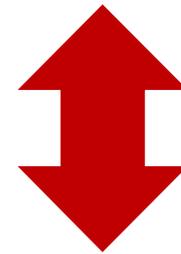
Tx 信号漏洩の抑圧と
線形性の改善が必須

一例 CA_1A_3A_8A

Band 1 UL 1920~1980 MHz DL 2110~2170 MHz

Band 3 UL 1710~1755 MHz DL 1805~1880 MHz

Band 8 UL 880~915 MHz DL 925~960 MHz



DL帯域と重畳

非線形信号例

2 * Band 3 UL - Band 1 UL = 2085~2250 MHz

2 * Band 8 UL = 1760~1830 MHz

解決策: 非線形性を減らしましょう! だけどどうやって?

講演内容

3. 黎明期(1980年代)

TV-IF SAW市場の立ち上がり、RF SAW素子の提案

バブル経済
Japan as No. 1

時代は第2次産業革命＝電子立国の時代 先端技術はマイクロコンピュータ

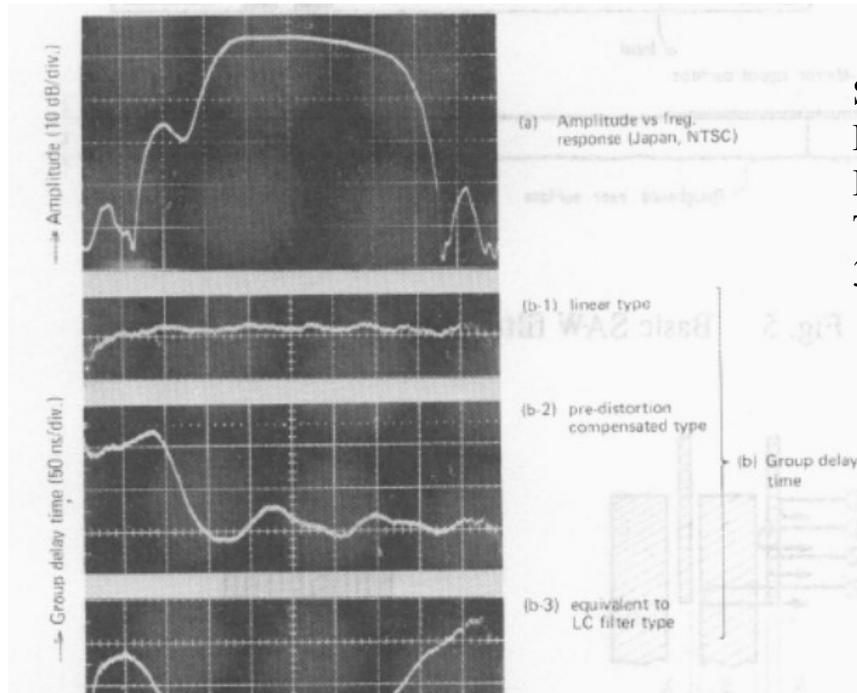


時代は第2次産業革命＝電子立国の時代 先端技術はマイクロコンピュータ

マスメディア曰く、“デジタルと半導体技術がこの世を席卷し、旧態然とした非シリコン・アナログ技術はまもなく全てシリコン・デジタル技術に置き換わる。”

時代は電子⇒大学から強電関係の研究室消滅？

日本におけるSAWビジネスの日の出



S.Takahashi, H.Hirano, T.Kodama, F.Miyashiro.
B.Suzuki, A.Onoe, T.Adachi and K.Fujinuma, "SAW
IF Filter on LiTaO₃ for Color TV Receivers," IEEE
Trans. Consumer Electronics, **CE24**, 3 (1978) pp.
337-348.

この文献中に、誇らしげに以下のように記載

SAW filter mass production was started in September, 1977, and has just been increased to an output of more than 150 thousand pieces per month.

実用化されると殆どの大学関係者が撤退

当時は大学と企業が完全に分離

某有名日本大企業の方が曰く、“企業は細部まで理解しており、大学に手伝って貰う必要はない。唯、優秀な学生を企業に送込んで貰うだけでよい。本当の教育は企業内で行います。。。”

筆者のSAW研究開始当時の論文

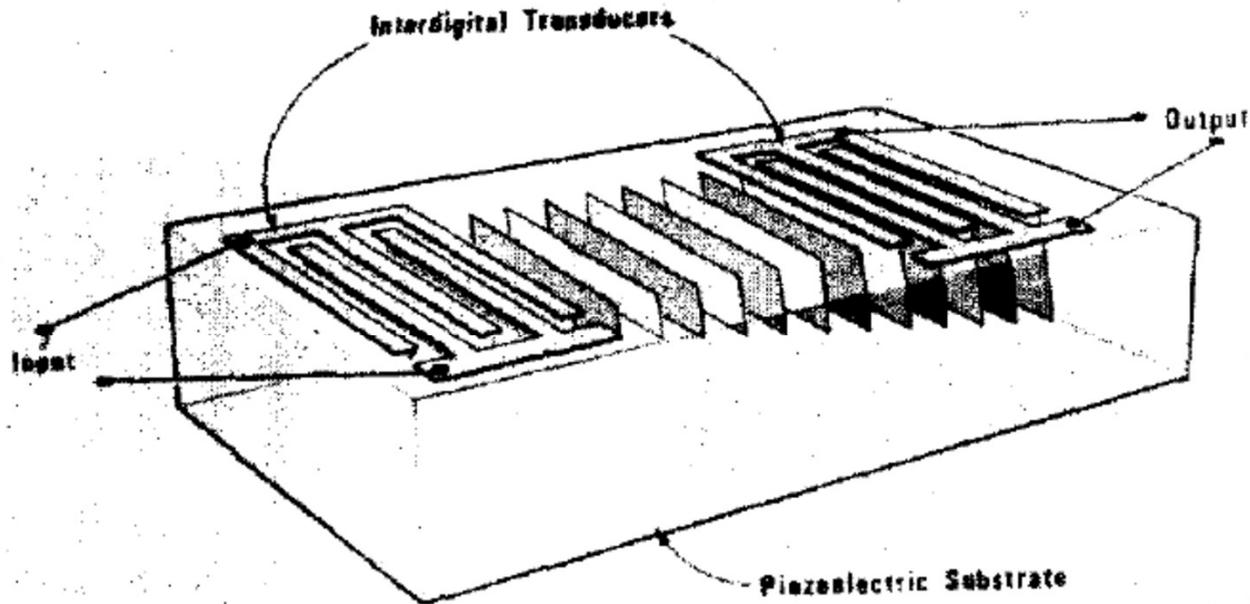


FIGURE 3. Schematic view of SSBW device.

M.F.Lewis, "SURFACE SKIMMING BULK WAVE, SSBW,"

Proc. IEEE Ultrason. Symp. (1977) pp. 744-752

物理数学の知識と数学的素養が必要

この手の話が一番自分に合う！

36° YX-LiTaO₃ (36-LT) はSSBWカット

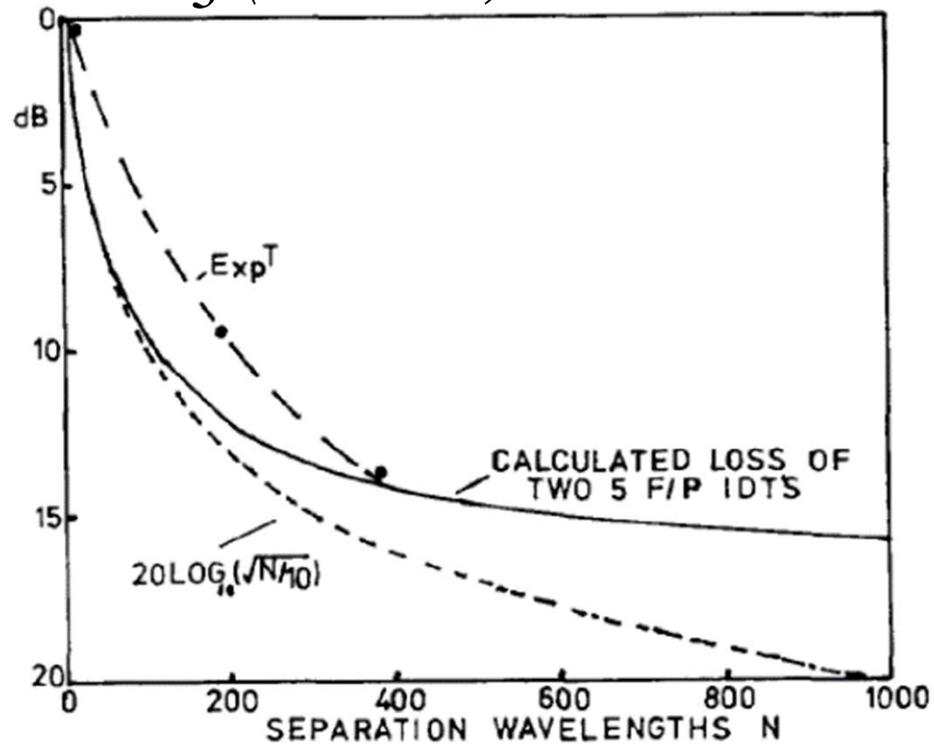
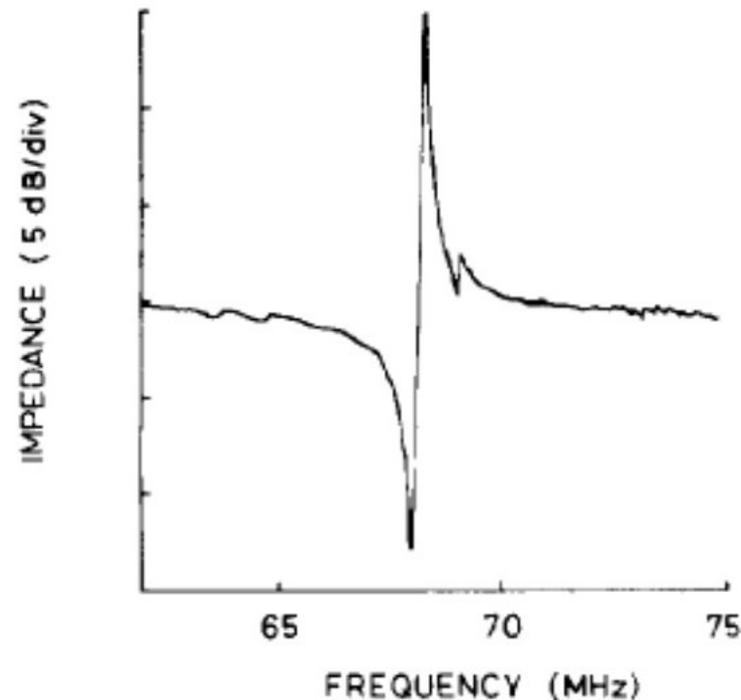


FIG 3. Calculated and measured variation of the relative insertion loss between two 5-finger-pair IDT's as the separation is varied on +36° rotated y-cut LiTaO₃.

T.I.Browning, M.F.Lewis, and R.F.Milsom, "Surface Acoustic Waves on Rotated Y-cut LiTaO₃," Proc. IEEE Ultrason. Symp. (1978) pp. 586-589

同じシンポジウムで 東北大学 中村教授 らは36-LTは漏洩SAWカットとの報告



何故結論が異なる？ ⇒ **基板表面状態の影響**

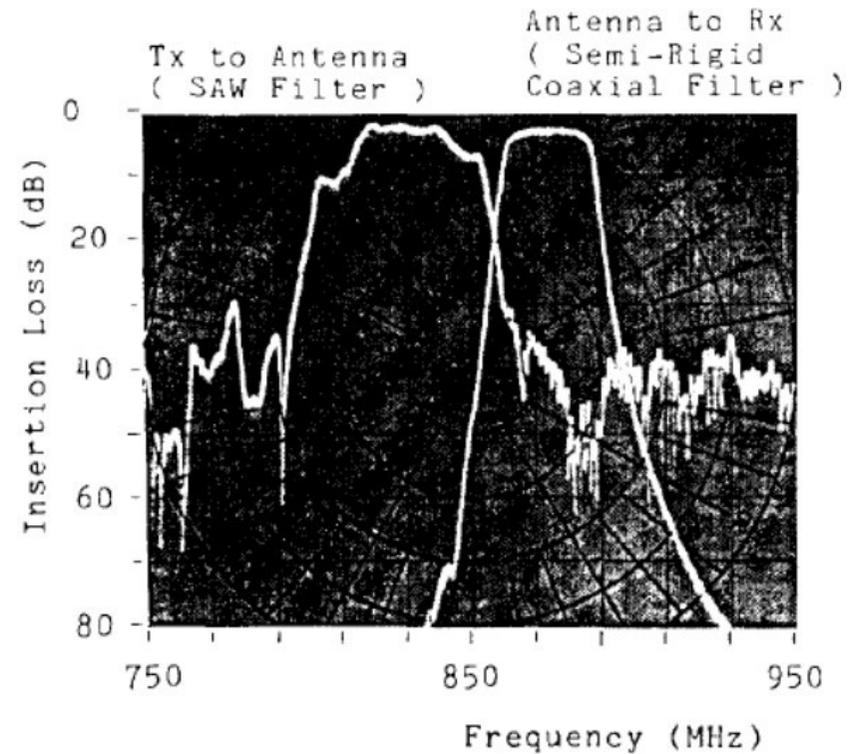
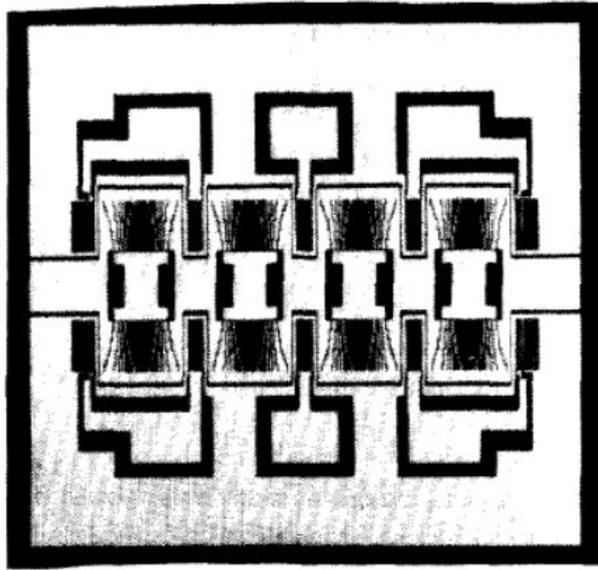
K. Nakamura, M.Kazumi, and H.Shimizu, "SH-Type and Rayleigh-Type Surface Waves on Rotated Y-Cut LiTaO₃," Proc. IEEE Ultrason. Symp. (1977) pp. 899-892

某有名日本大企業の方が曰く、“その様な純学問的研究は不要。現在のシミュレーションツールは十分に正確で、全ての必要なパラメータは実験で全て決定できる。”

ほんまかいな???

Japan as No. 1としての奢り？

SAWアンテナ共用器(DPX)の最初の挑戦



- 大きな圧電性が必要 → 36-LTの利用
- この基板上のSAWの振る舞いは通常のSAWと同じ？

挿入損失や耐電力性、帯域外抑圧等に問題。。市場もまだ

M.Hikita, T.Tabuchi, H.Kojima, A.Nakagoshi, Y.Kinoshita, "Low Loss SAW Filter for Antenna Duplexer," Proc. IEEE Ultrason. Symp. (1983) pp. 77-82

東北大学名誉教授 故 清水洋先生



東北大学名誉教授 故 清水洋先生

お前の話は難しくて判らない。

ただ、何回か聞いているうちに
判ってきた気になる。だから、
何度でも話をしろ！

*お前は超音波を何年研究している
んだ！十数年程度だろう。40年
以上研究している俺と比べるな！*

同一基板に2つの非漏洩SAW存在

@ 1988 IUS at Chicago

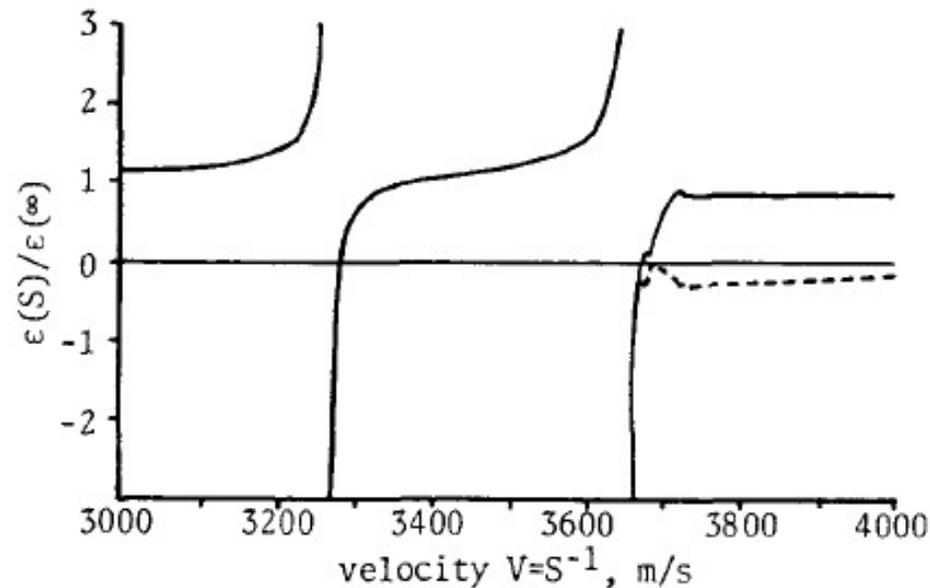


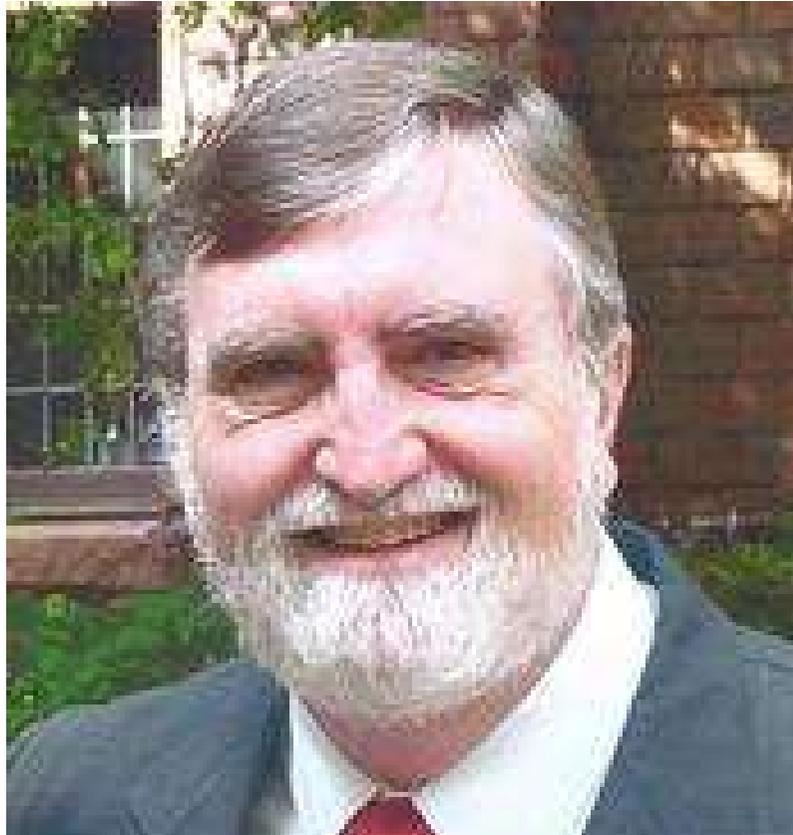
Fig.A-1 $\epsilon(S)$ for X-148°Y-LiTaO₃ as a function of $V=S^{-1}$. Solid line: real part, and broken line: imagat.

K.Hashimoto and M.Yamaguchi, "Non-Leaky, Piezoelectric, Quasi-Shear-Horizontal Type SAW on X-cut LiTaO₃", Proc. IEEE Ultrason. Symp. (1988) pp. 97-101.

日本の学界、産業界は実効誘電率に興味なし

Clinton Sylvester Hartmann

(December 31, 1944 - February 4, 2013)



- 34歳でTIの技術者最高位(TI Fellow)。部下はphD 80人！
- 35歳でRF Monolithics創業

Clinton Sylvester Hartmann

(December 31, 1944 - February 4, 2013)

“君の話は面白い。もっと細かく説明して!”

彼が理解できないのは説明している
私自身がよく理解していない証拠。
彼が理解できた後の彼の説明の方が
格段に的確で簡明。

講演内容

- 4. 展開期(1990年代) バブル崩壊
RF SAW市場立ち上がり ITバブル

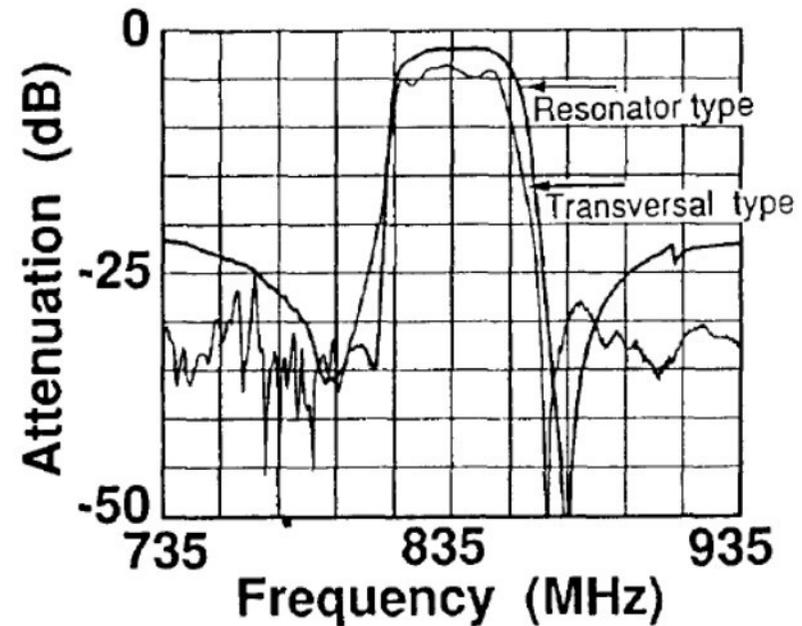
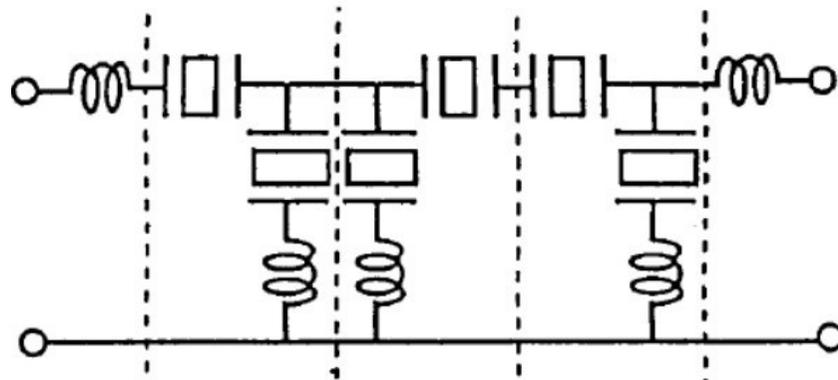
1989年Motrola Micro-TACの発売



携帯電話市場の火付け役

= RF SAWデバイス研究開発の活発化

ラダー型SAWフィルタ



耐電力性と低損失の両立



AMPS用SAW Duplexerの量産化

O.Ikata, T.Miyashita, T.Matsuda, T.Nishihara, and Y.Satoh, "Development of Low-Loss Band-Pass Filters Using SAW Resonators for Portable Telephones," Proc. IEEE Ultrason. Symp. (1992) pp. 111-115

Clintonの要請によりASPに招聘

ASP (Advanced SAW Products, SA)に集ったメンバー

Clinton Hartmann

David Morgan

Victor Plessky

Dongpei Chen

Thor Thorvaldsson

Sergei Kondratiev

Ivan Avramov

Christian Lambert

Mohammed A. Sharif

Marc-Andre Schwab

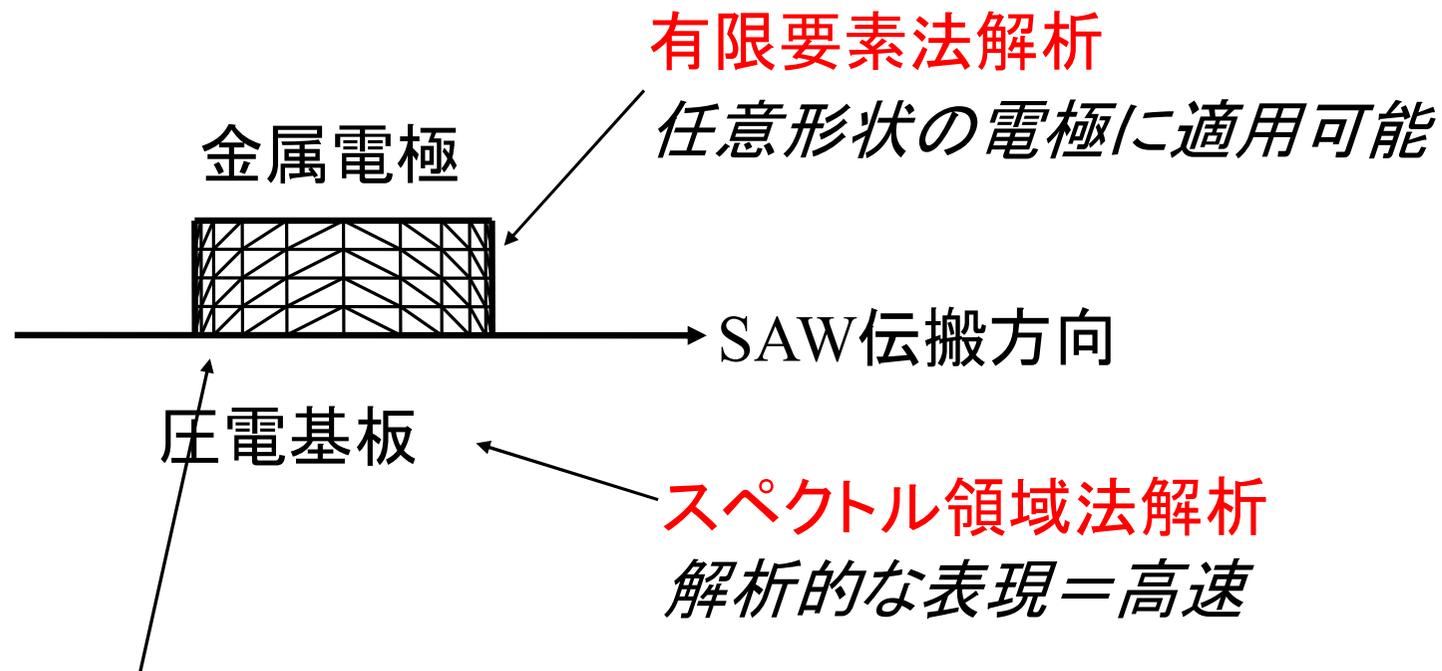
Shen Jen

毎日午後に技術会合

Clinton曰く、“産業界は高速・高精度の
SAWシミュレーションツールを欲している。
それこそ企業が大学に望む仕事だ！”

FEM/SDA

圧電性 + 電極の影響を含む実効的な表面誘電率の計算



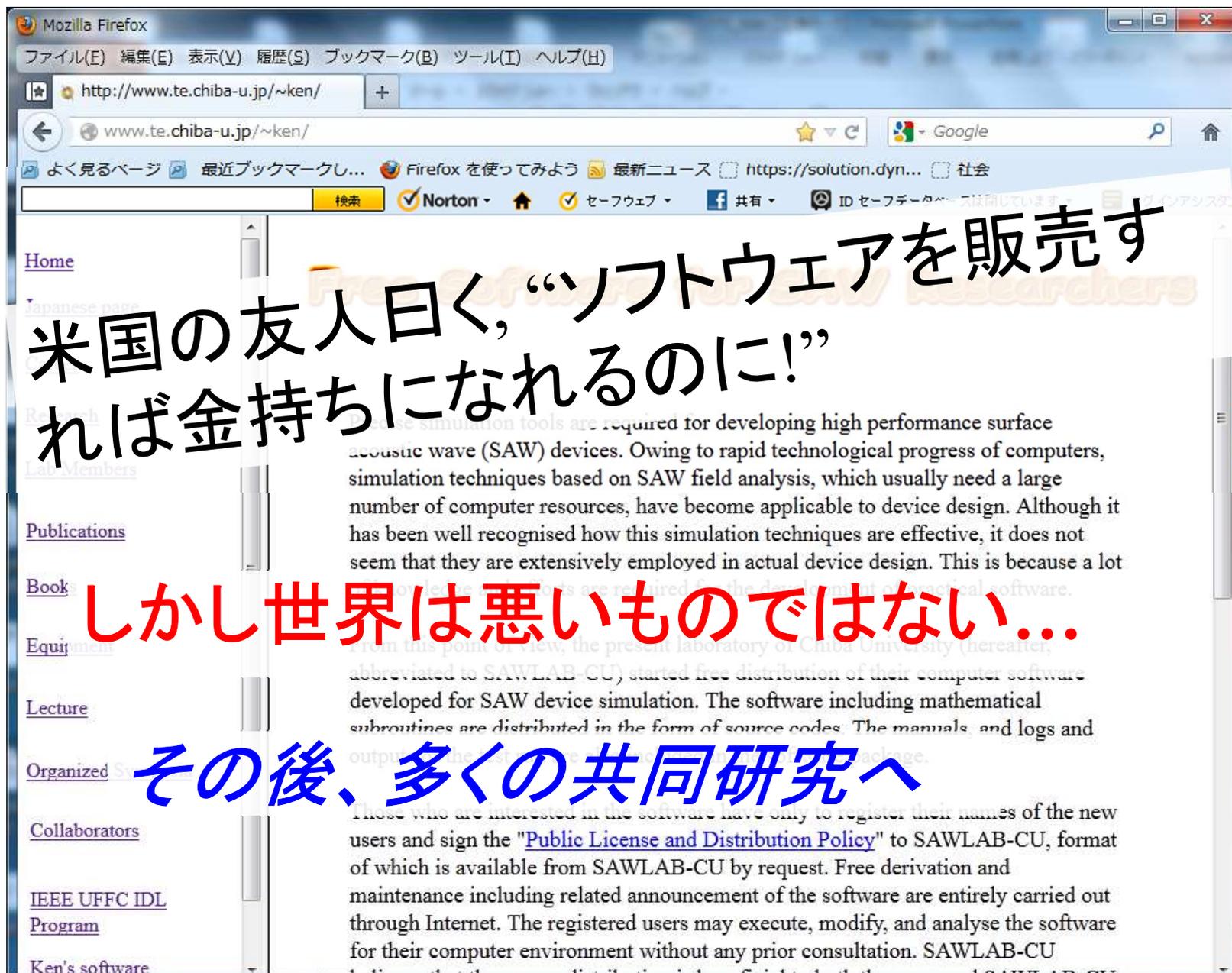
境界条件: 境界から放射される誤差パワーの最小化

G.Endoh, K.Hashimoto, and M.Yamaguchi, "Surface Acoustic Wave Propagation Characterisation by Finite Element Method and Spectral Domain Analysis," Jpn. J. Appl. Phys., **34**, 5B (1995) pp. 2638-2641.

FEM/SDA

ASPはFEM/SDA開発に支援を約束。親会社(Nokia)経由での資金送付を計画したが、結局支援は実現せず。(でもプログラムはできちゃった)

ClintonからFEMSDAの話聞いたBen Abbott (当時RF Monolithics)がその利用を渴望 ⇒ 世界中に無料配布

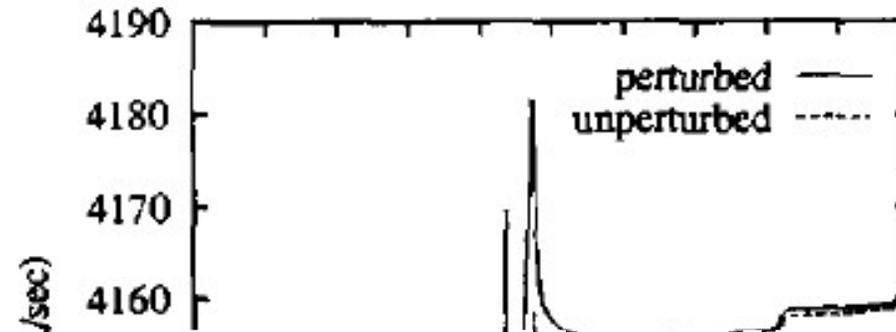


米国の友人曰く、“ソフトウェアを販売すれば金持ちになれるのに!”

しかし世界は悪いものではない...

その後、多くの共同研究へ

電極厚零での36-LT上の非摂動漏洩SAWの速度



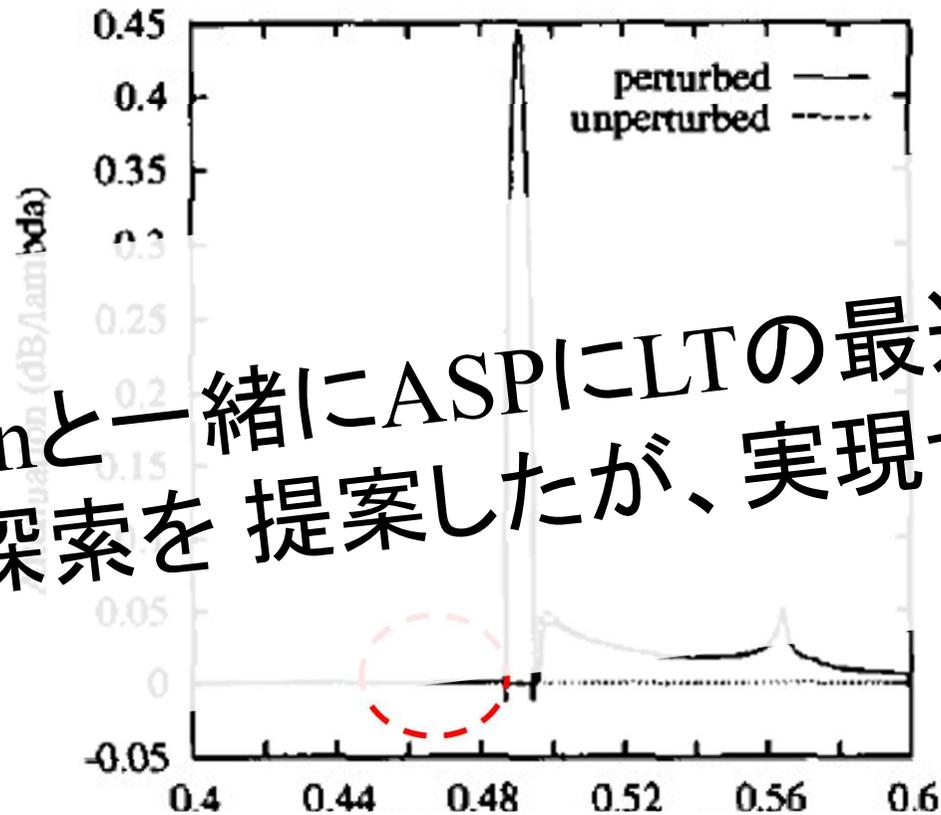
あとは原因を調べてモデル化するだけ！

多くの企業でシミュレーション手法として即座に採用

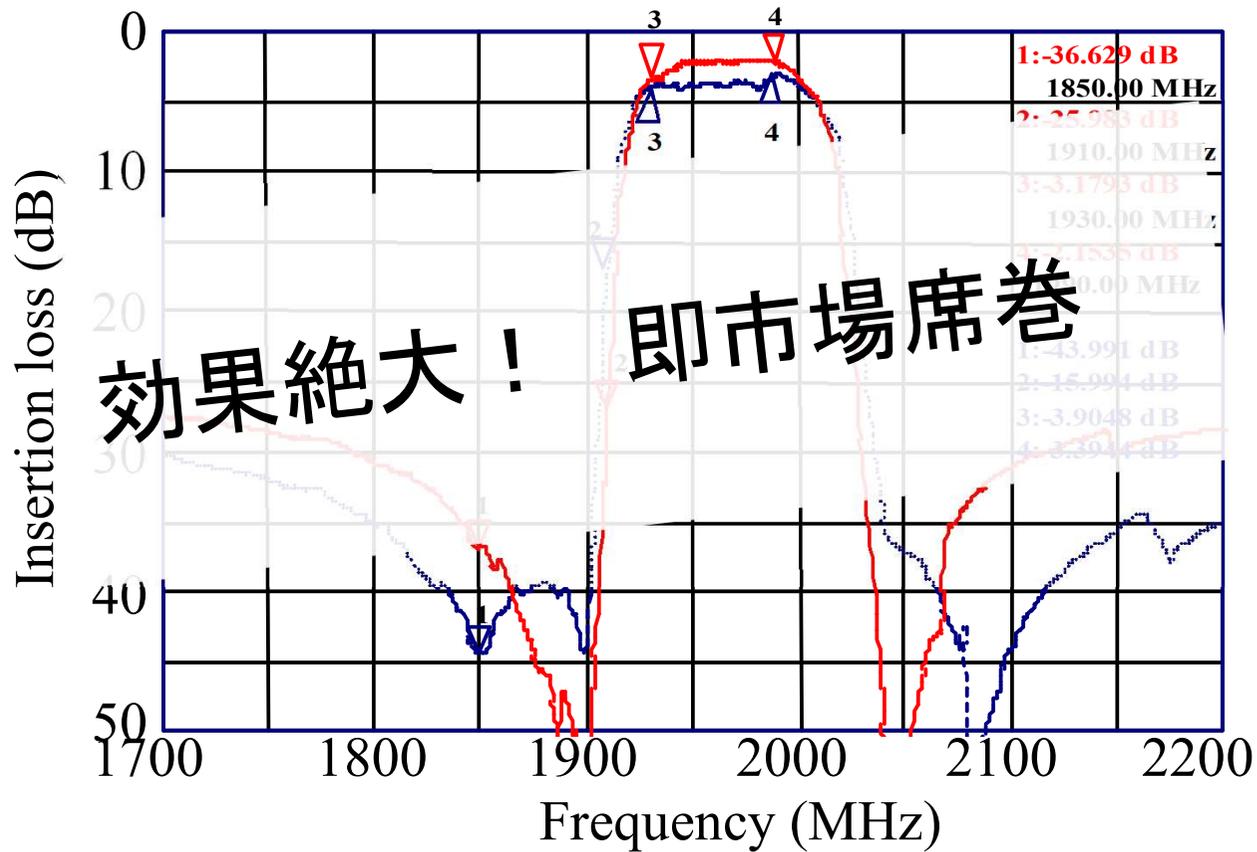
Clinton曰く、“見よ！ SAW速度が共振付近で急激に減少している。これは我々が経験的にのみ知っている現象だ！”

電極厚零での36-LT上の非摂動漏洩SAWの減衰

Clintonと一緒にASPにLTの最適結晶方位角探索を提案したが、実現せず。。。。



Clinton曰く、“見よ! 漏洩損失が周波数で変化し、共振周波数で最少となっていない。損失の最少化は常に必要だ!”



PCS-Rx用ラダーフィルタ特性. 赤: 42-LT, 青: 36-LT

最終的に富士通 (現太陽誘電)が特許取得！

K.Hashimoto, M.Yamaguchi, S.Mineyoshi, O.Kawachi, M.Ueda, G.Endoh, and O.Ikata, "Optimum Leaky-SAW Cut of LiTaO₃ for Minimised Insertion Loss Devices," Proc. IEEE Ultrason. Symp. (1997) pp. 245-254

価値ある特許でお金を得るには？

誰もができれば使用料を支払いたくない！

1. 特許無効化や弱体化の訴えへの対応
2. 対抗特許、類似特許の監視
3. 特許侵害の証拠集め ⇒
特許使用料請求 ⇒
場合によっては訴訟

大学の知財部門では対応不可能

当時の噂：2 GHz帯SAWデバイスは困難

1. 製造装置は半導体からのお古
2. 電極膜厚均一性2-3%

市場が拡大すると

3. 装置製造メーカーがSAW専用堆積装置を開発
4. 電極膜厚の均一性が一桁向上

**市場さえ大きければ、何でも可能となる！
エネルギー保存則以外は信じるな！**

講演内容

5. 混乱期(2000年代)
BAW市場立ち上がり
TC SAW/BAW技術の開発

ITバブル崩壊
リーマンショック

BAW共振子の夜明け(US PCS Duplexer)

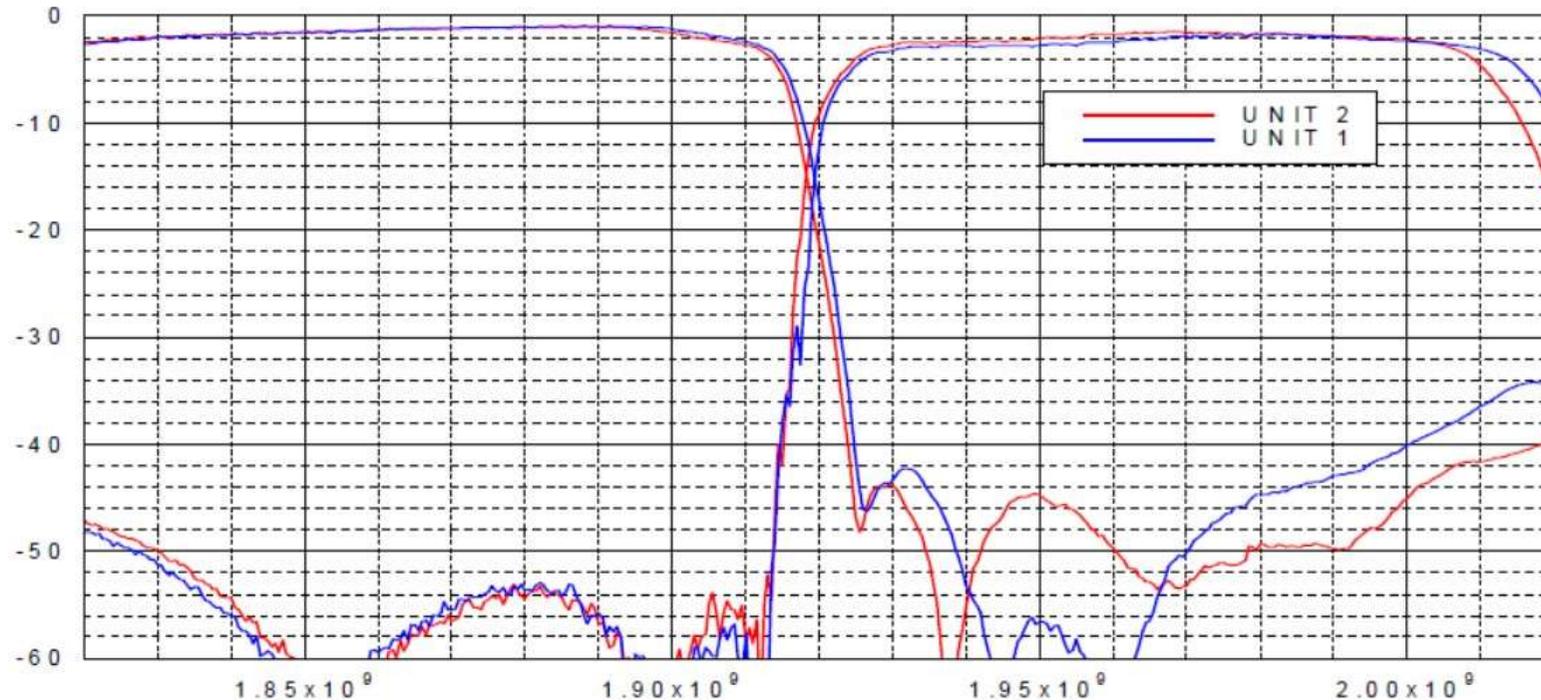


Fig. 12. Two Agilent FBAR Builds circa Sept. 2001. Note rejection in the Tx band is -54 dB and -44dB in the Rx band.

狭いTx-Rx間隔(20 MHz)=2000年当時SAWでは実現困難

R.C.Ruby, P.Bradley, Y.Oshmyansky, A.Chen, and J.D.Larson, "Thin Film Bulk Acoustic Resonator (FBAR) Wireless Applications," Proc. IEEE Ultrason. Symp. (2001) pp. 813-821

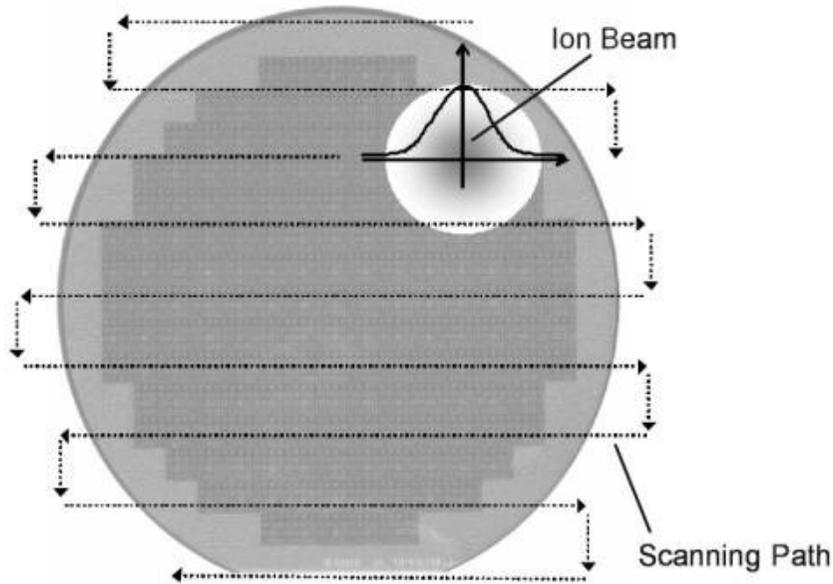
NOKIAの後押しで多くの半導体企業が参入検討

BAW共振子の夜明け(US PCS Duplexer)

より高い膜厚均一性要(0.01%以下)

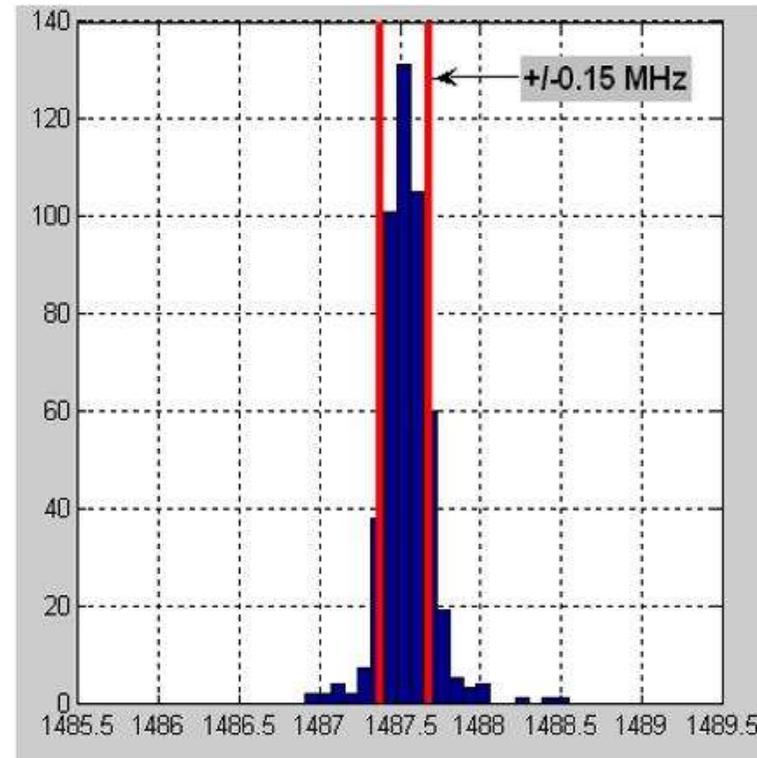
どうやって膜厚を制御？

膜厚トリミングツール



イオンビーム走査

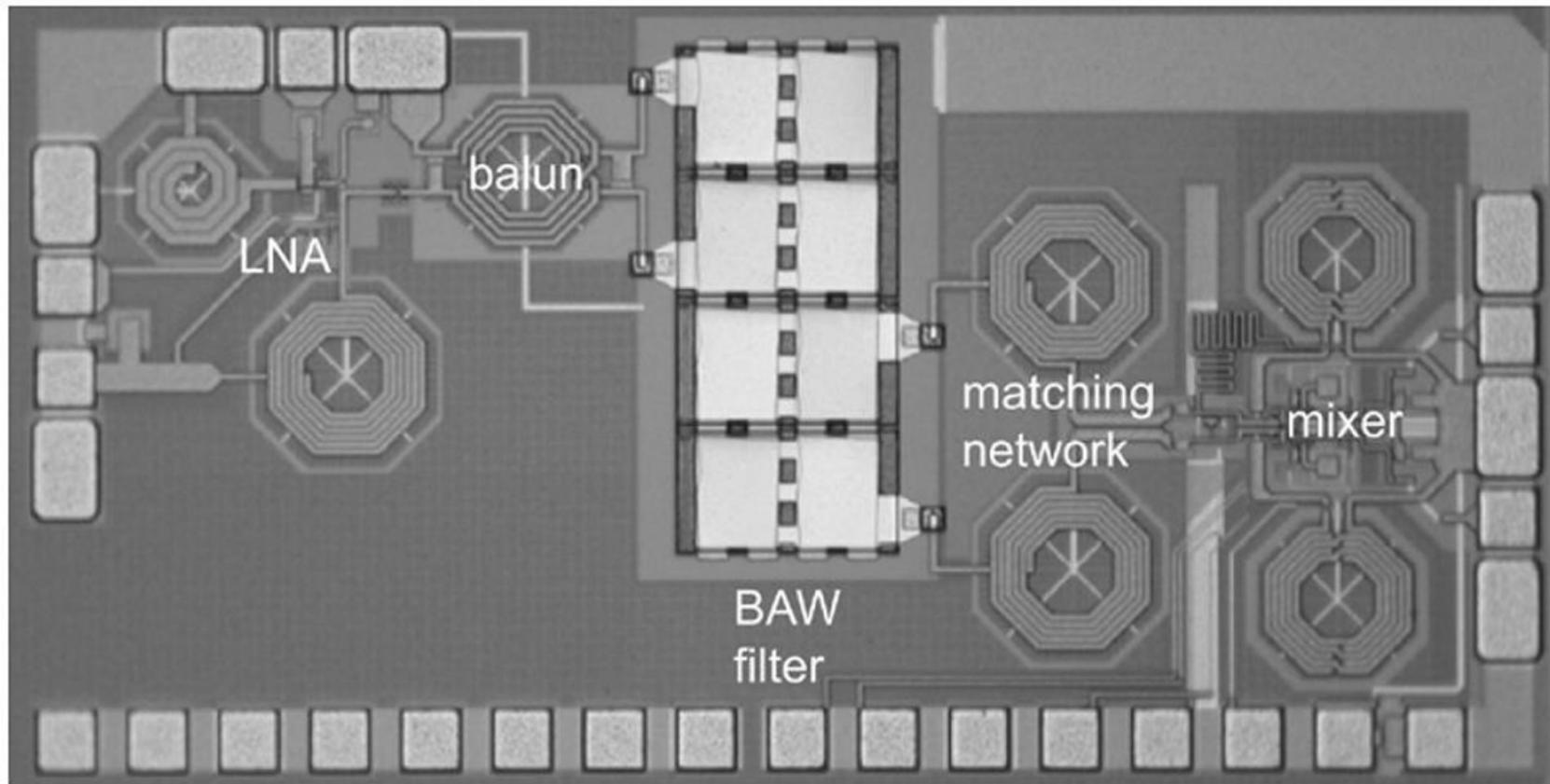
事前に測定した厚さ分布により走査速度を調整



トリミング後の6インチウェハー上の共振周波数分布

市場さえ大きければ、何でも可能となる！

RF CMOSチップ上へのFBARの集積化



Si基板の利用＝モノリシック集積化は可能

一つのチップ上に複数のアンテナ共用器集積可能？

M.A. Dubois, et al., IEEE J. Solid State Circuits, Vol. 41 (2006) pp. 7-16

マスメディアとアナリスト曰く

- デジタルは常にアナログより素晴らしく、アナログ技術は近々デジタル技術に置き換わる。
- ハイテクは常にローテクより格段に勝る。従ってハイテクのみが勝ち残る。
- 全てはLSIに集積化される。そのため、個別部品はまもなく消え去る。

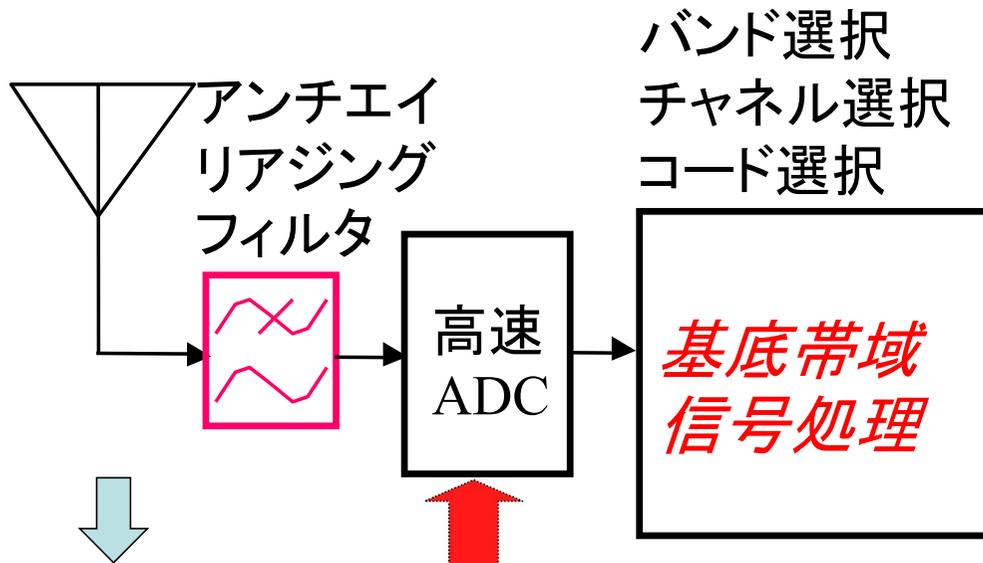


SAWはすべてBAWに置き換わる！

捨てセリフ: 大学のセンセイは世の中を知らない！

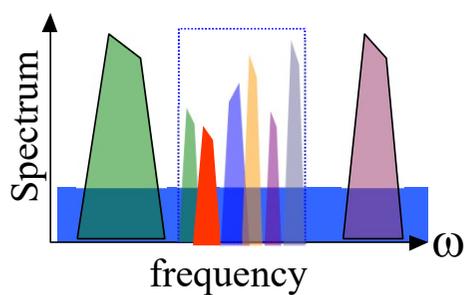
多くのSAW企業が撤退、投資意欲減退

ソフトウェア無線機 (SDR)



SDD内のソフトウェアで多くの通信方式に対応

ソフトウェアダウンロードで容易にアップグレード可能

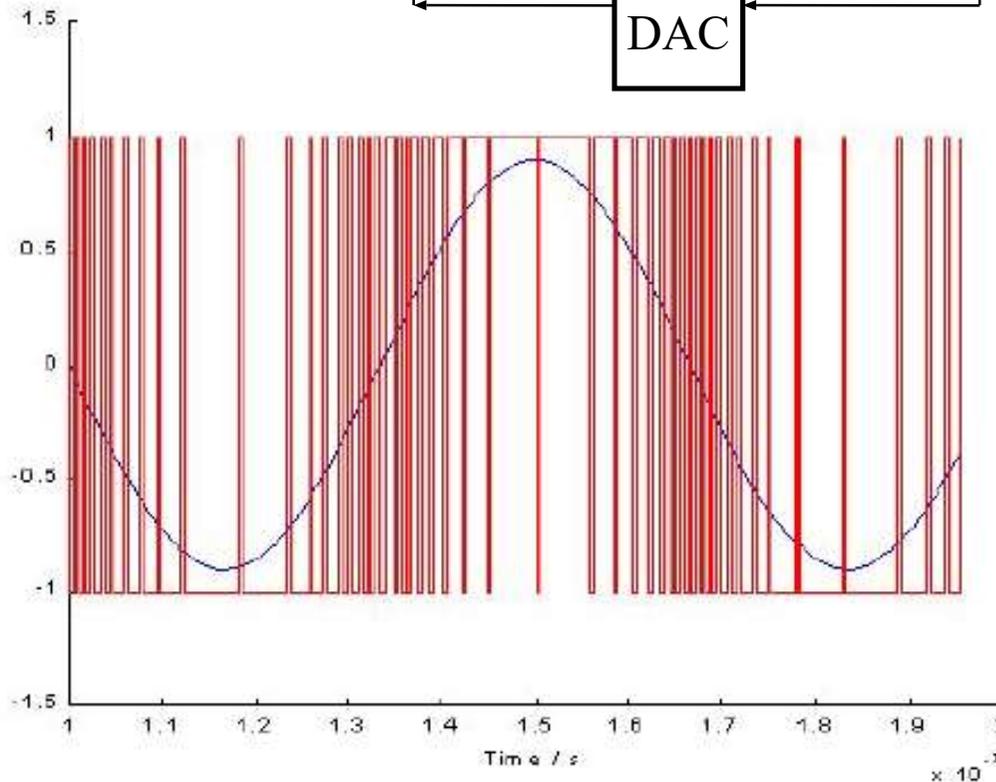
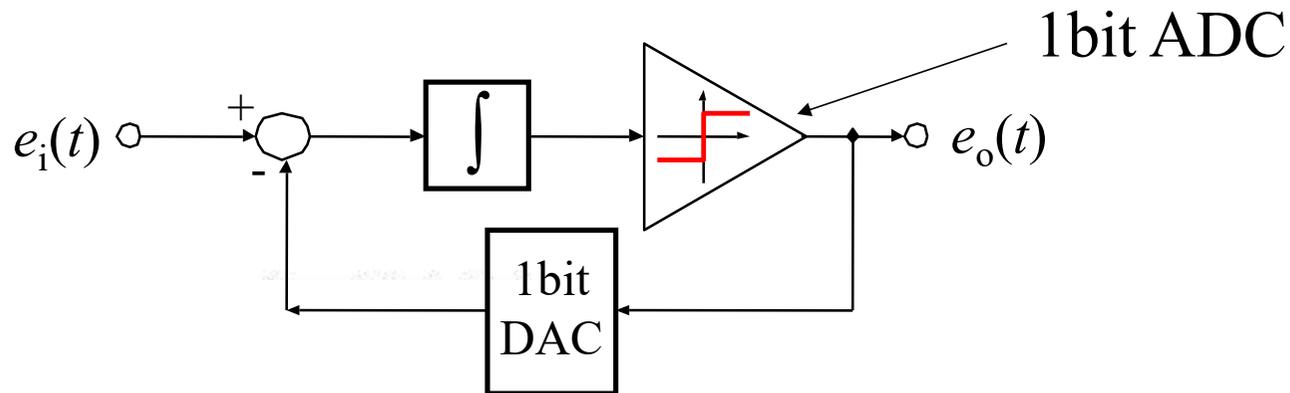


広帯域 (3 GHz)
高標本化周波数 f (6 GHz)
高分解能 (24 bit)

FDDの場合

LSI技術の進歩で対応可能?

シグマデルタAD変換器の出力波形

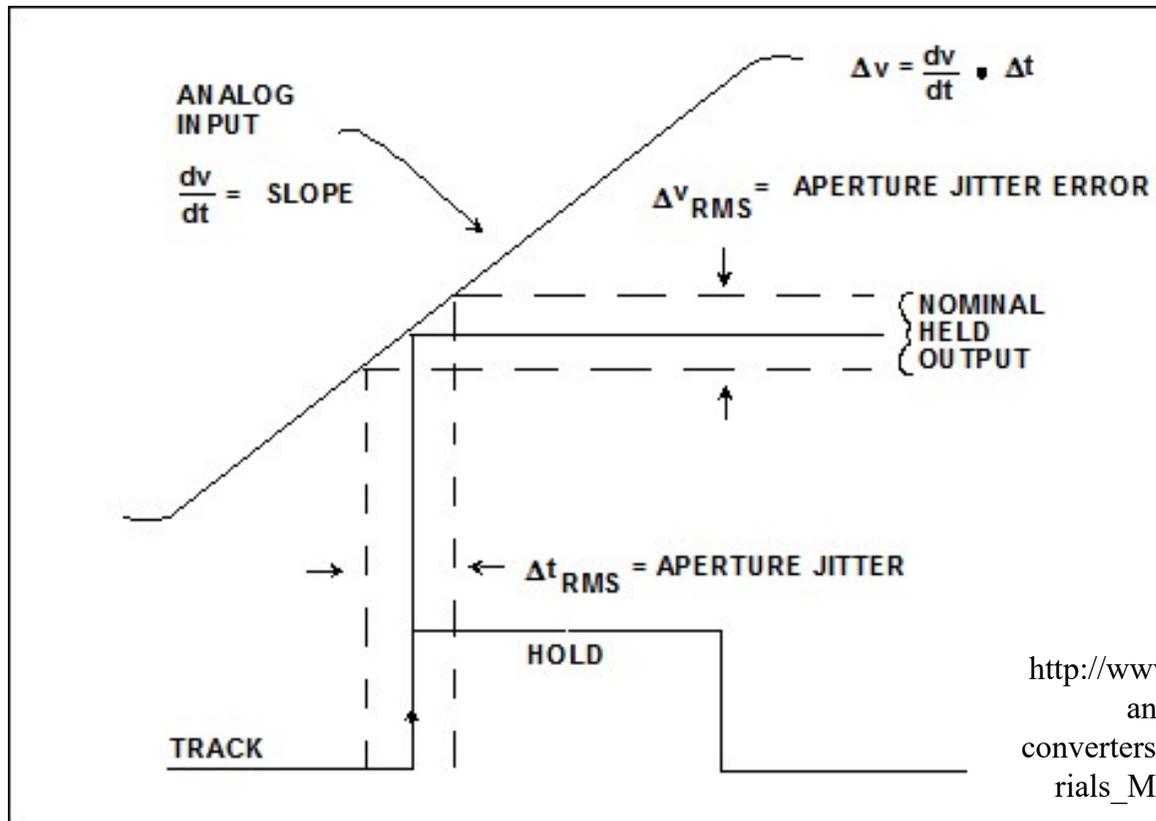


パルス幅変調(PWM)

＝パルス幅によって
振幅を表現

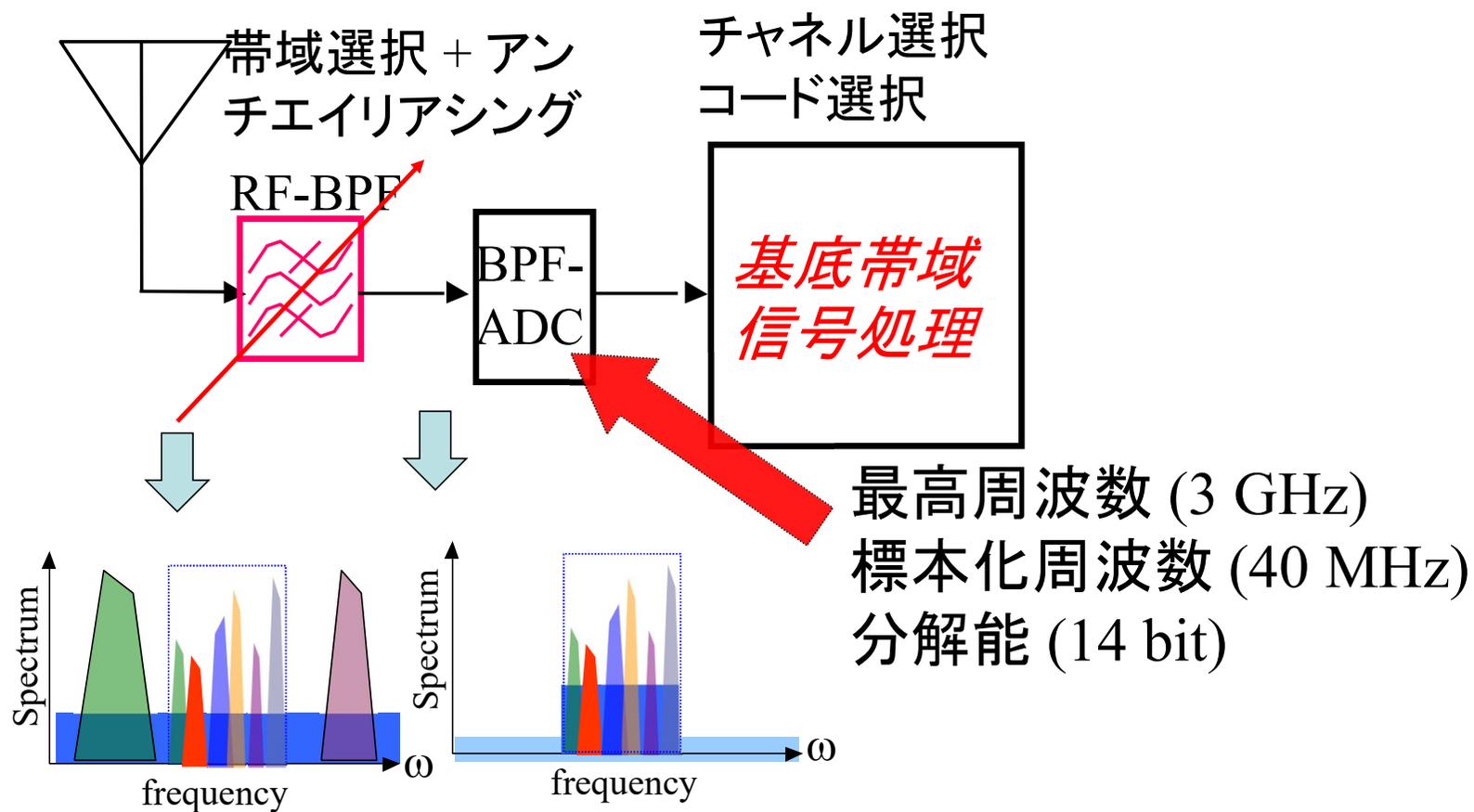
マイクロプロセッサ
で直接出力可能
⇒ 1 bit Audio

高速AD変換に対するジッタの影響

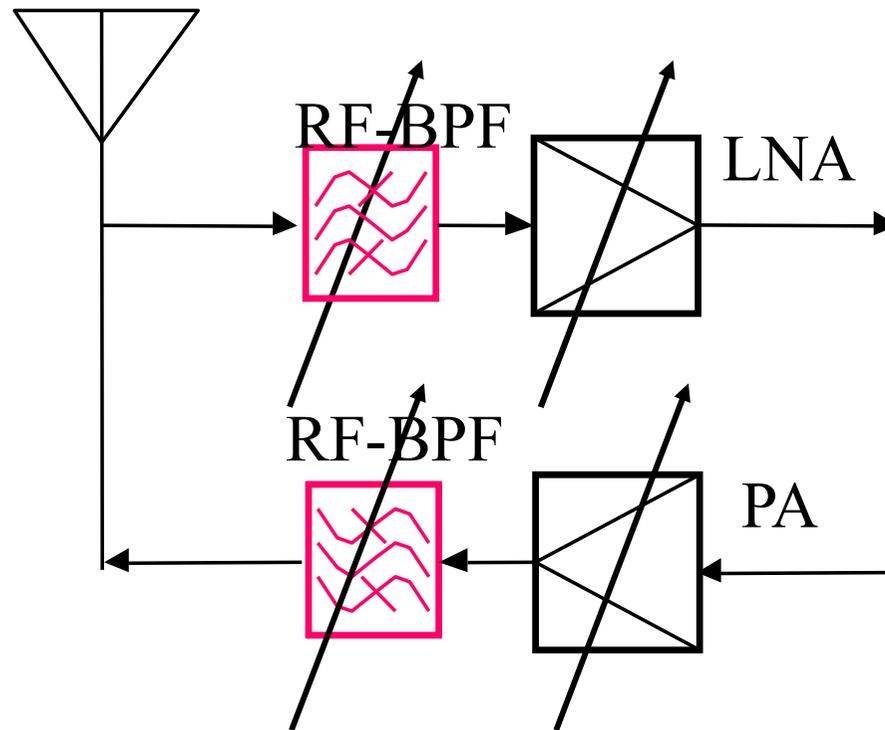


クロックの揺らぎ(ジッタ)が振幅変動(誤差)を発生
周波数が高くなるほどジッタの影響大

理想に近いSDR



低損失, 線形, 低雑音, 狭遷移帯域幅,
温度安定, 耐電力性良, 小型, 軽量かつ
安価な可変アンテナ共用器は?



助教授(現在の准教授)の年季奉公を終えて

ヘルシンキ工科大学客員教授

1998年(3ヶ月)

振動子物理研究所(LPMO), CNRS

客員研究員 1998/1999年(3ヶ月)

リッツ大学客員教授 1999年(6ヶ月)

1. 雑用がなければ研究がなんと進むことか！
2. 大学の残ったのは研究したいからではないか！

Robert Weigel, エルランゲン大学教授



ドイツ流研究室運営手法の師範

- どうやって優秀な学生を集めるか？
- どうやってスタッフ(秘書, 助手, 学生)を活用するか？
- どうやって企業とうまく付き合うか？

研究室主任教授: 准教授2名+秘書2名+助教3名+
PhD学生59名

3社を創設

ドイツは週36時間勤務、年6週間休暇 何故ドイツ企業が日本企業と勝負可能？

1. 博士学生が社内で研究開発を実施
2. 成果は会社の名前で発表
3. 共同研究費から給料支給
4. 優れた学生はそのまま雇用

シミュレーションを重視

5. 技術者労働時間の最少化
6. 計算機は一日24時間、年365日勤務
7. ある程度の地位以上では秘書が支援

欧米は日本より優れている？

1. 綺麗なお仕事に優秀な人材集中
= 製造現場の軽視
2. 株主最優先⇒景気に大きく左右
= 景気悪化で大学との契約解除
⇒ 研究能力の劣化(再開困難)
3. 短気利益重視⇒ 長期的思考困難

日本の特長は？

4. 製造現場の重視(他国でTQCが可能？)
5. 長期的思考=ノウハウの蓄積
6. アウトソーシングが何を齎したか？

何故企業と共同研究？

1. 外部資金確保 ← 成功報酬
2. 継続性高く、安定した資金
3. 互いの強みの相乗効果
4. 現有装置に限定されない研究課題の推進
5. 学生への動機づけ
6. 技術動向、企業の悩み等の情報収集
7. 現行研究課題に対する率直な評価

金も出すが、口も挟む関係が重要！

太陽誘電モバイル(旧富士通) 上田政則氏

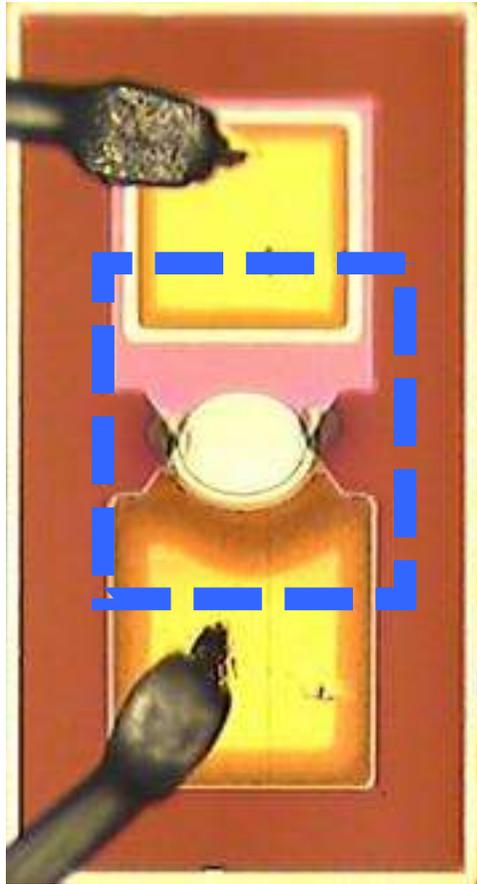


長年の互いに頼り頼られる関係

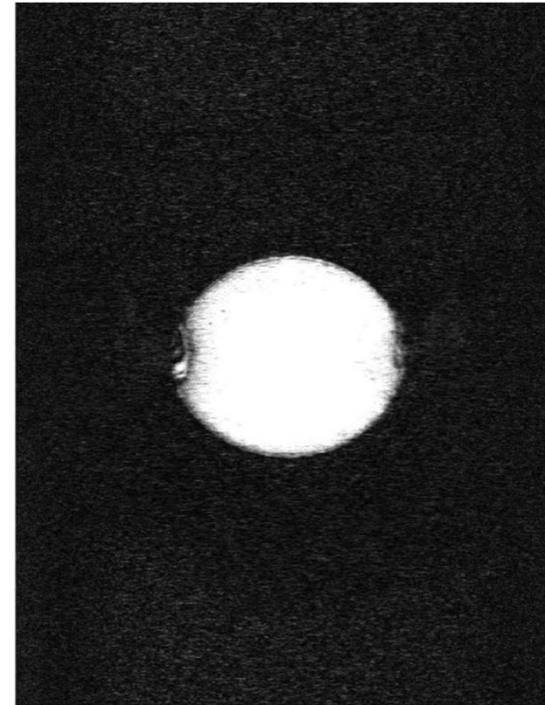
SAW/BAW素子用レーザプローブシステム

光学部はNeoark社
に製作依頼 ⇒ 開発
終了後は外販許可





光学像



音響像

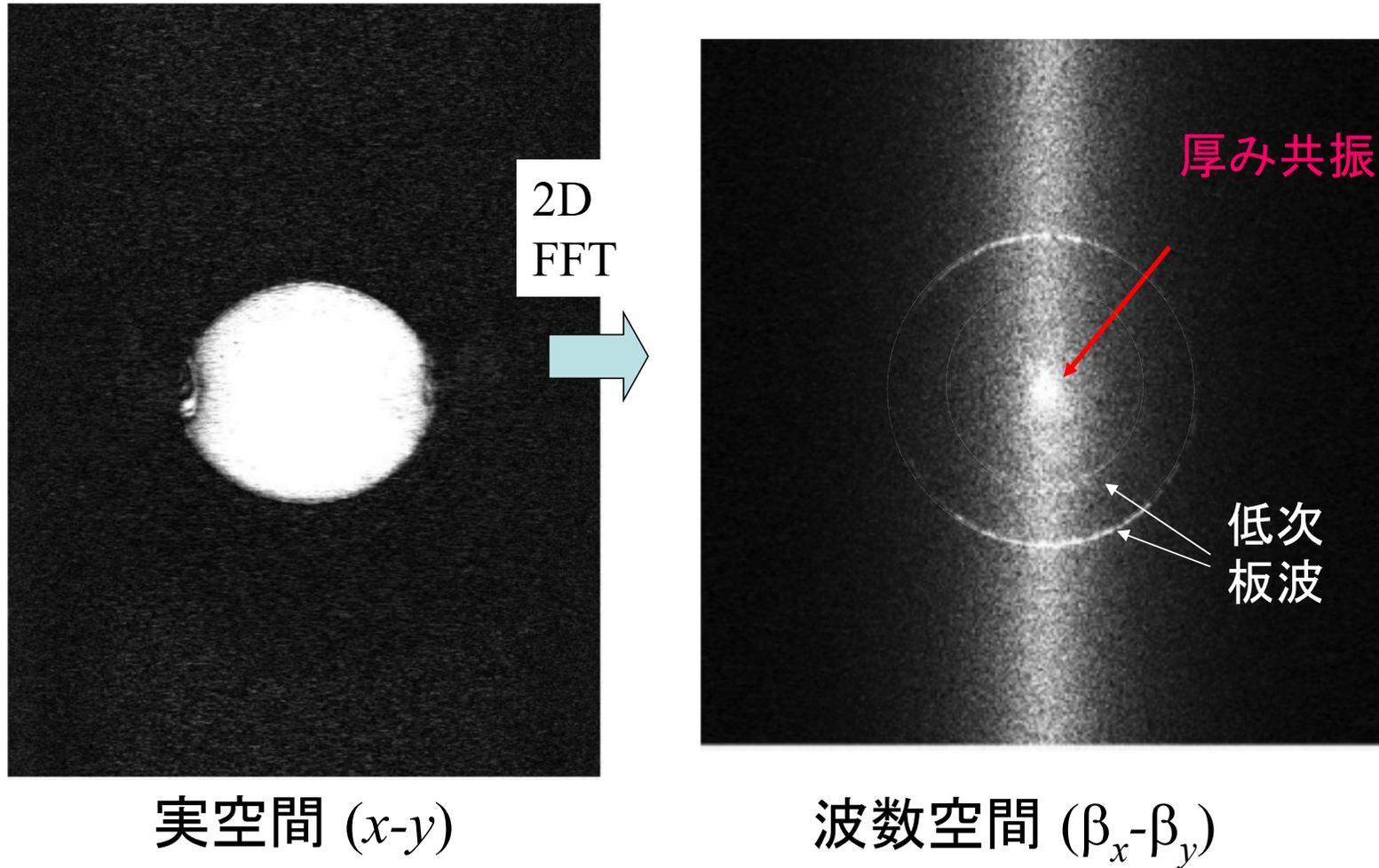


BAW共振子観測例 (5.262 GHz) 800×1000 pixels (0.2 μm step)

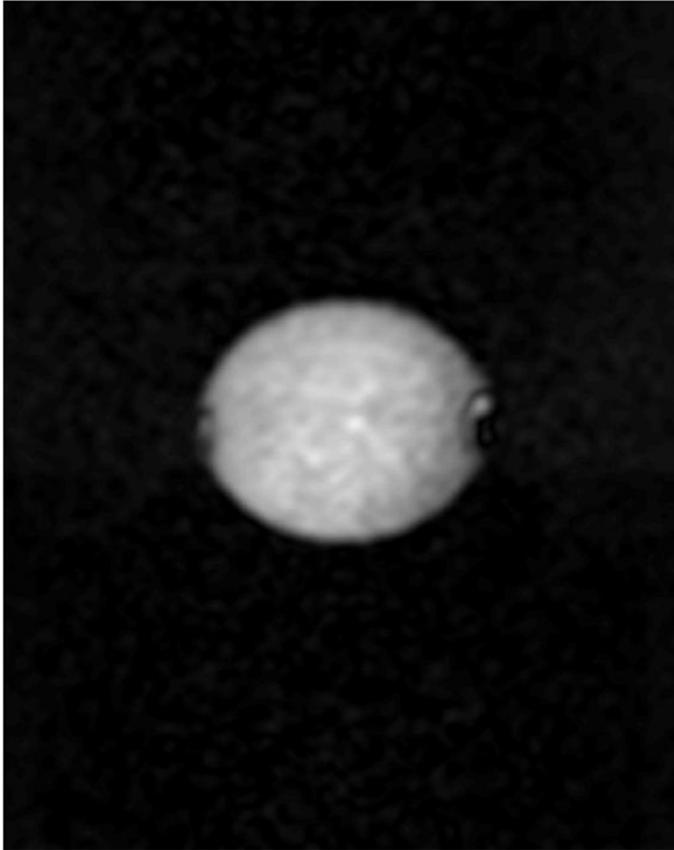
SAW研究者の視点からの要求

1. 最大周波数 (> 2.5 GHz) 
2. 画像処理のために位相検出可 
3. 高空間分解能 (< 0.5 μm) 
4. 高感度 (SH型SAWや厚み共振にも応用可) 
5. 高速 (一走査当たり < 20 min.) 
6. 専有面積少 (暗室や光学台無し) 
7. 利用が簡単 (オペレータ不要) 
8. 校正された振幅測定 

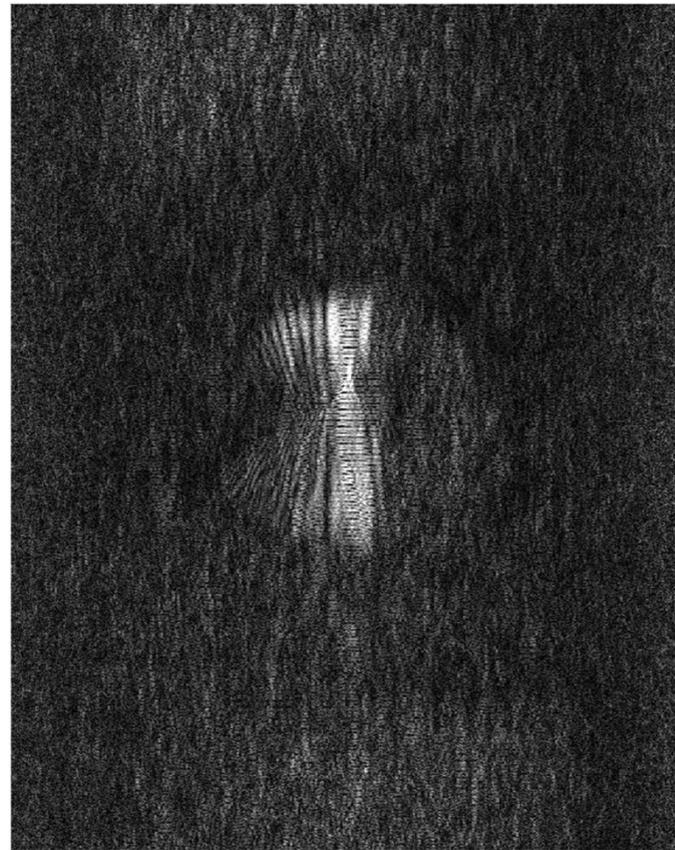
波数空間解析 @ 5.262 GHz



波数領域で抽出した後、実空間に変換

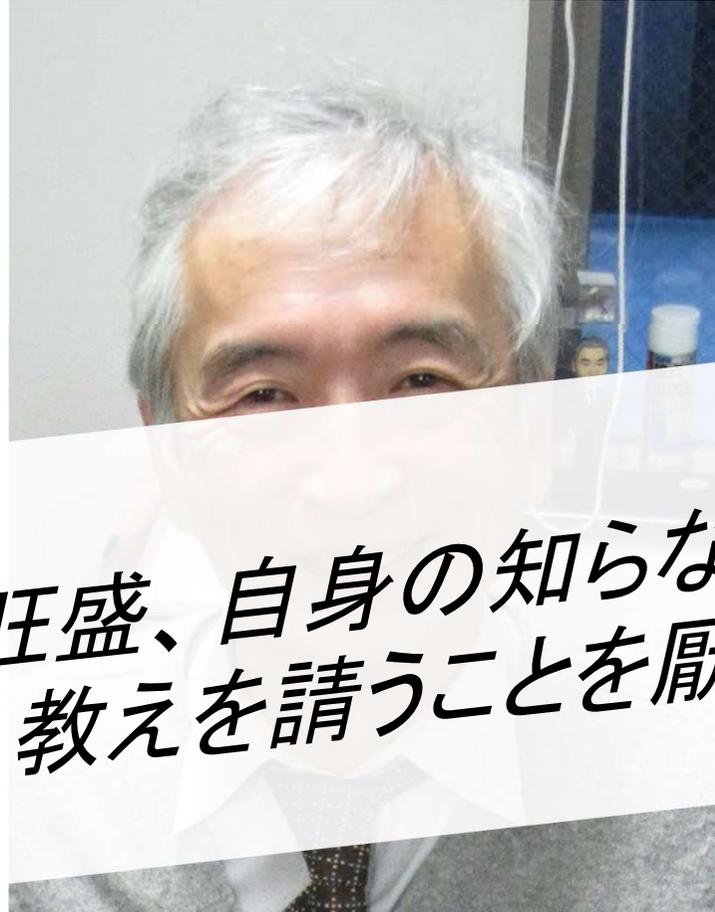


(a) 厚み共振成分
(中心の成分)



(b) 板波伝搬
(外側の円の成分)

東北大学名誉教授 江刺正喜先生



好奇心旺盛、自身の知らないことを
隠さず、教えることを厭わない。

日本企業が選出した「最も産業界に貢献した大学教授」
微小電子機械システム(MEMS)の世界的権威

林進寶, 台湾晶技(TXC)創業者・会長



1983年TXC創業

台湾での立志伝中の人物

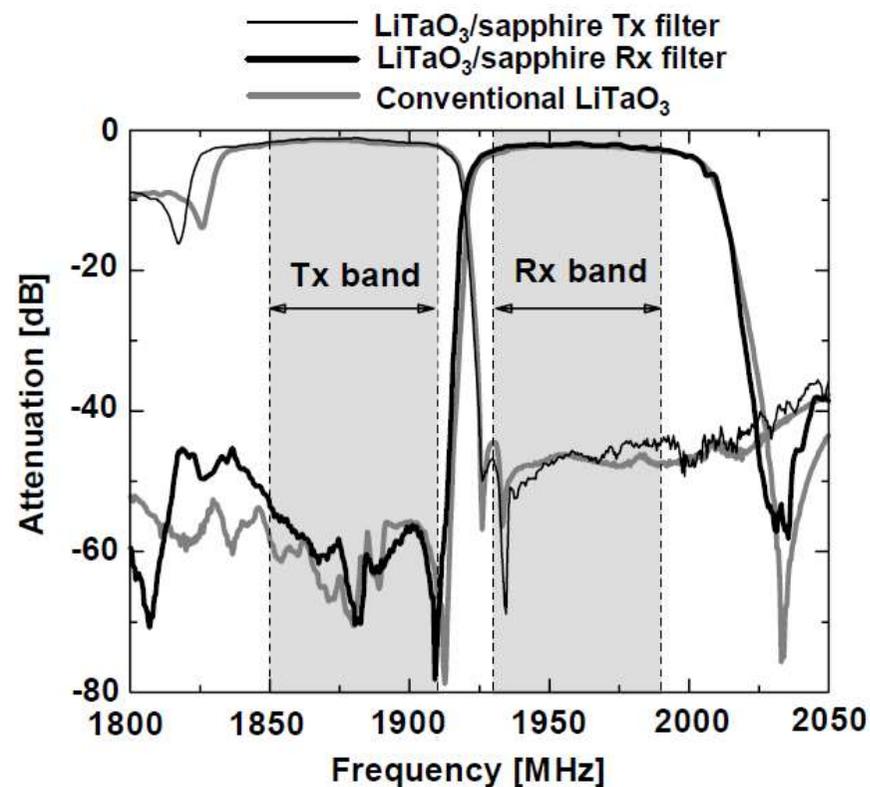
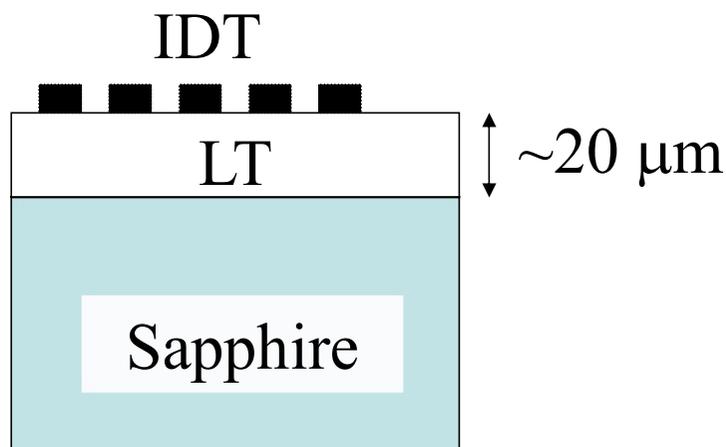
技術者でないにも関わらず深い工学的知識(好奇心旺盛)

講演内容

6. 成長期(2010年代)
SAW/BAW市場の急拡大

GAFA席捲

LT/Sapphire張り合わせ基板



応力により温度特性制御

超音波特性・圧電性に劣化なし

M. Miura, T. Matsuda, Y. Satoh, M. Ueda, O. Ikata, Y. Ebata, and H. Takagi, "Temperature Compensated LiTaO₃/Sapphire Bonded SAW Substrate with Low Loss and High Coupling Factor Suitable for US-PCS Application," Proc. IEEE Ultrasonics Symposium (2004) pp. 1322-1325

SiO₂/Cu/128-LN構造温度補償(TC) SAWデバイス

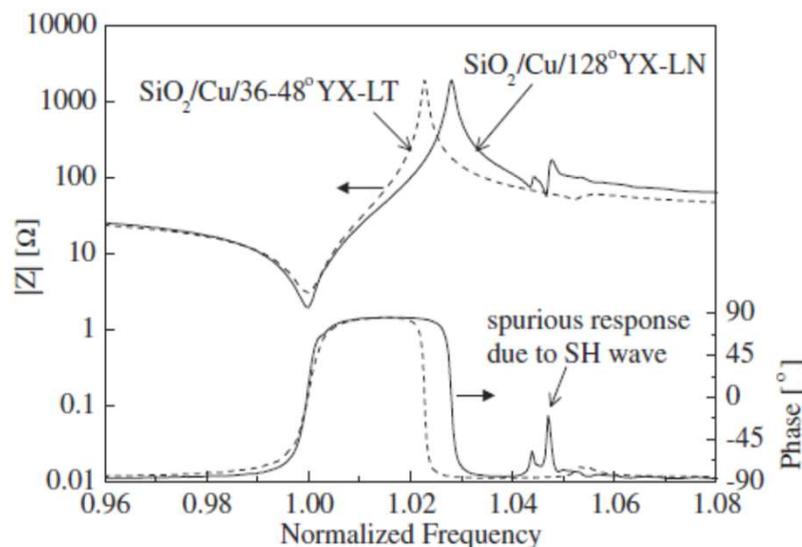


Fig. 4. Frequency responses of resonators composed of conventional and newly developed structures.

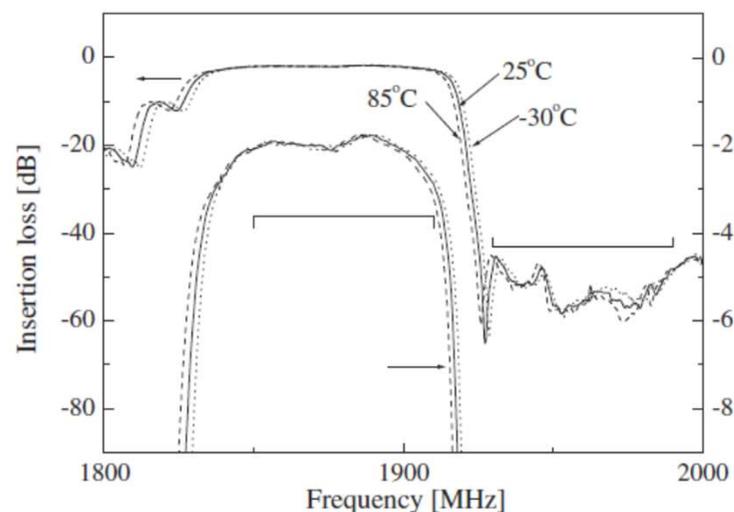


Fig. 7. Tx filter showing wide-range spurious responses of conventional (dashed line) and newly developed (solid line) duplexers.

SiO₂の特異な温度依存性を利用

T.Nakao, M.Kadota, K.Nishiyama, Y.Nakai, D.Yamamoto, Y.Ishiura, T.Komura, N.Takeda, and R.Kitamura, "Smaller Surface Acoustic Wave Duplexer for US Personal Communication Service Having Good Temperature Characteristics," Jpn. J. Appl. Phys., **46**, 7B (2005) pp. 4760-4763

BAW共振子へのSiO₂利用例

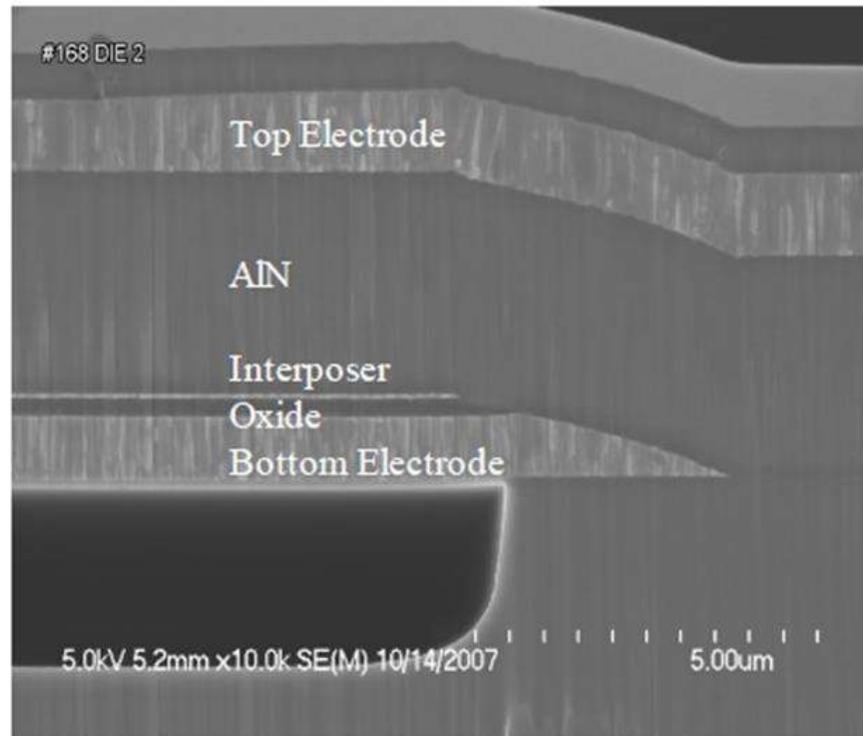
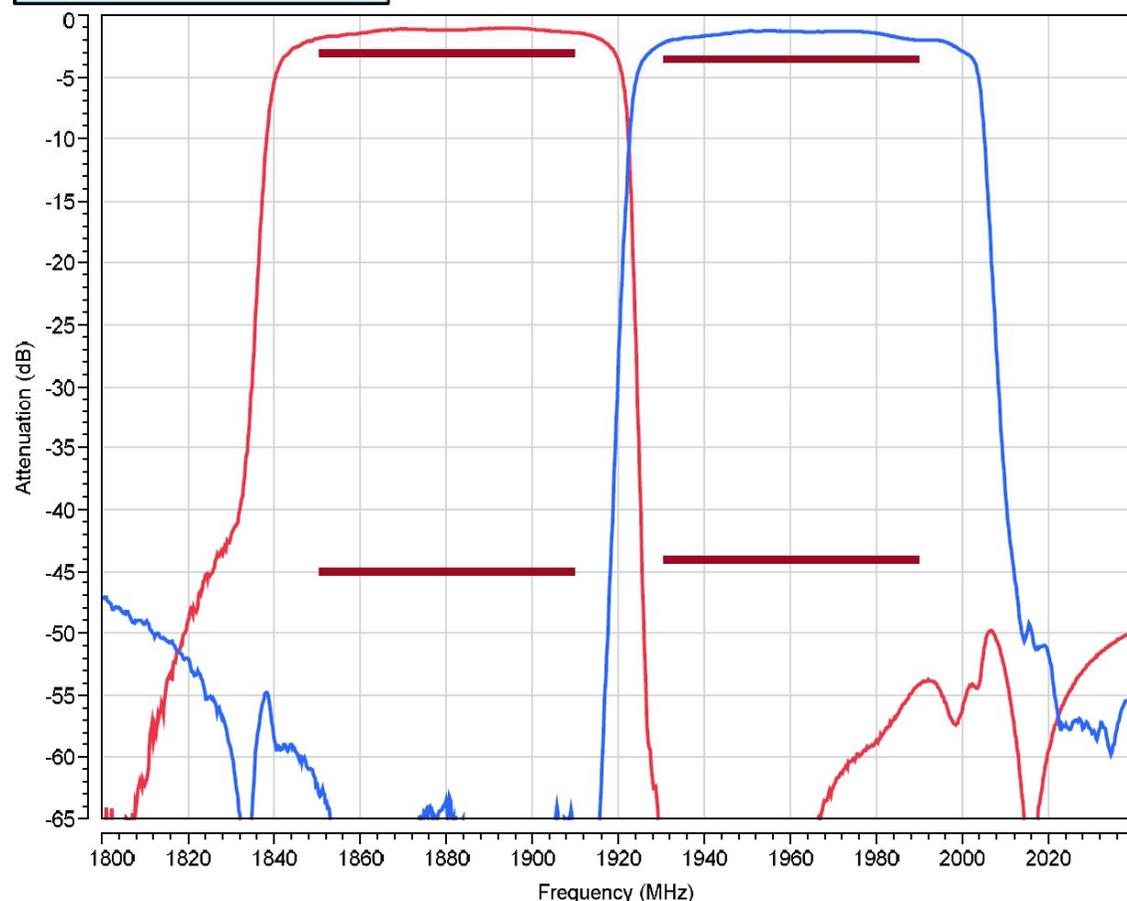


Figure 6. Cross section of a Zero Drift Resonator (ZDR). The edge of the 'swimming' pool is shown. The layers are labeled.

Rich Ruby, "A Decade of FBAR Success and What is Needed for Another Successful Decade," Proc. SPAWDA (2011) pp. 365-369

TC FBAR Duplexerの例

B25 Tx & Rx



R.Ruby and M.Gat,
“FBAR Filters- 2012,”
Proc. 2012 International
Symposium on Acoustic
Wave Devices for Future
Mobile Communications)
G1 -1~4

更に狭いTx-Rx間隔(15 MHz)

多層構造の利用

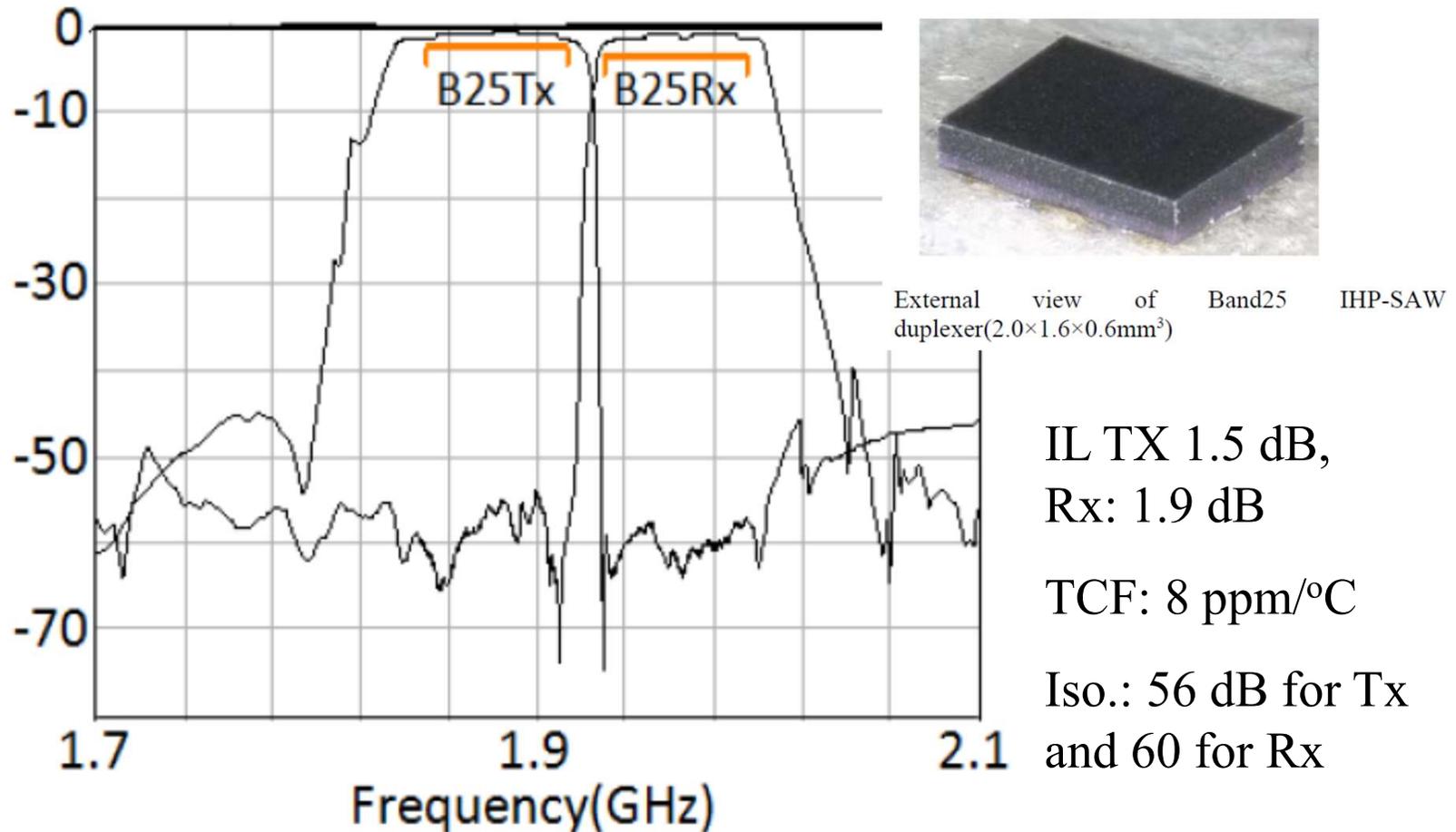


圧電層へのエネルギー集中

➡ 圧電性改善
基板への漏洩損失低減

大径LN/LT薄板(0.4 μm 厚)の大量生産は？

IHP SAWデュプレクサの性能



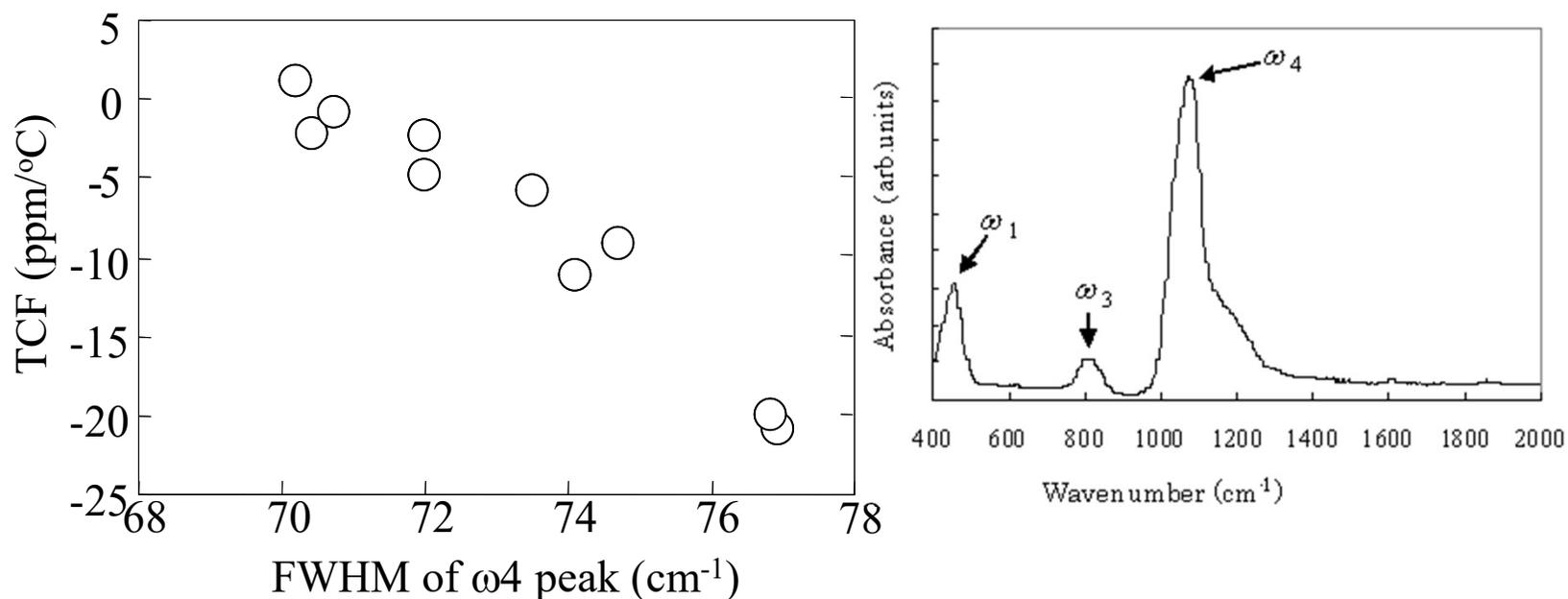
T.Takai, H.Iwamoto, Y.Takamine, T.Wada, M.Hiramoto, and M.Koshino, "Investigations on Design Technologies for SAW Quadplexer with Narrow Duplex Gap", Tech. Digest, IMS 2016

社会人博士学生(15+1名)

1. 実績を積んだ自信ある研究・技術者
2. 2年で修了できるよう事前準備
3. 皆素晴らしい成果の持ち主
4. 何故そのように考えたか、何故その結論を得たかの議論が不十分 ⇒ 私が理解できるように説明要請、場合によっては新たな検討追加も
5. 理解を深めると新たな結果
6. 私自身も多くの知見を習得

SiO₂膜におけるFTIRピークのFWHMとSAW素子のTCFの関係

SiO₂膜質は成長装置・条件で大きく変化



TCF改善能力を持つSiO₂膜成長装置・条件の探索指針

S.Matsuda, M.Hara, M.Miura, T.Matsuda, M.Ueda, Y.Satoh, and K.Hashimoto, "Correlation Between Temperature Coefficient of Elasticity and Fourier Transform Infrared Spectra of Silicon Dioxide Films for Surface Acoustic Wave Devices," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., and Freq. Contr., **58**, 8 (2011) pp.1684-1687.

外国人博士学生(10名)

1. 大学名や成績、自己推薦は役立たず
2. 上位校でも驚愕の学生数＝出来の差が大
3. 知り合いの先生からの推薦が有効
4. 大学の学生課の情報が適切
5. ダブルドクターディグリープログラムが当たり！
上海交通大学、電子科技大学
学費免除、高確率で国費奨学生待遇
落ちた場合のみ給料支給

講演内容

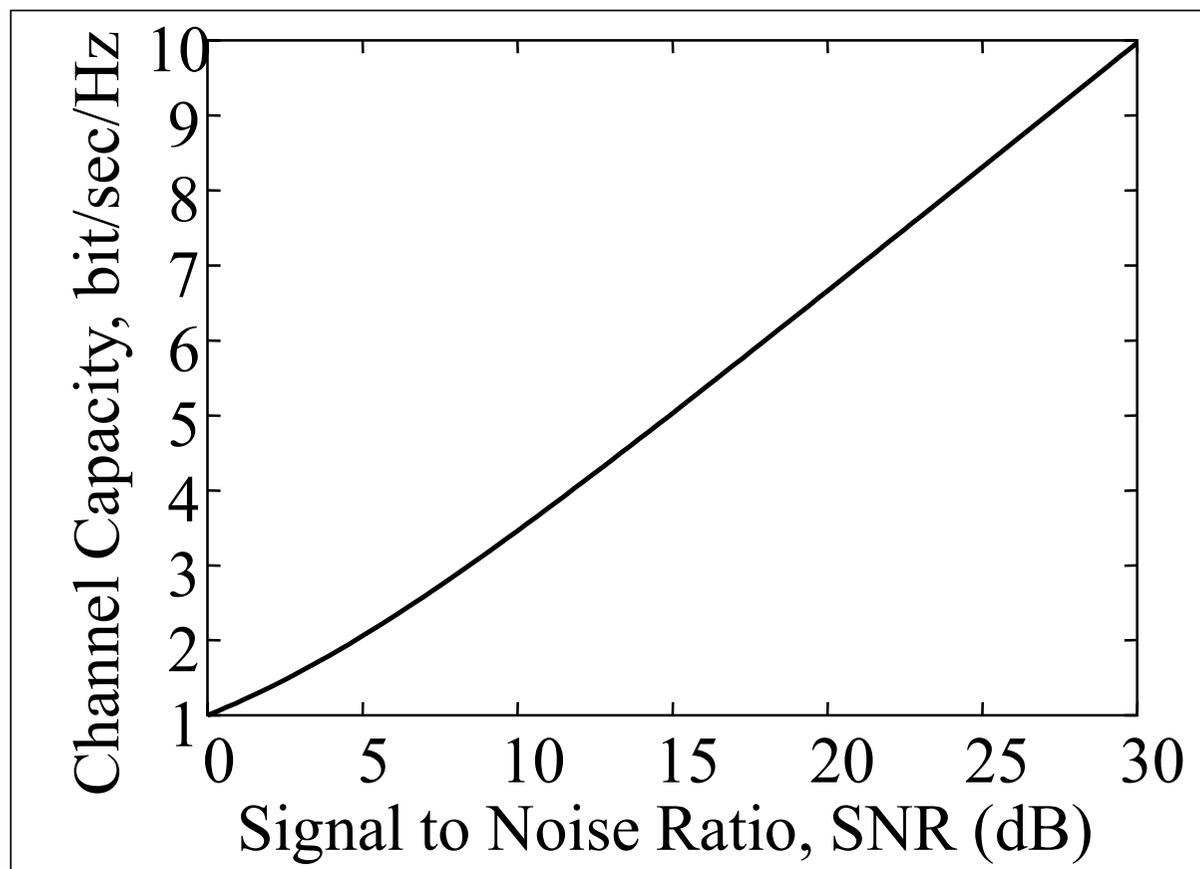
7. 今後の展望

After コロナ？

シャノン限界

与えられた帯域 B [Hz]に対する最大の通信速度

チャンネル容量: $C = MB \log_2(1 + \text{SNR})$ [bit/sec.]



SNR: 信号雑音比

M : アンテナ数(MIMO)

C を向上するにはは B の
増加かSNRの増加

RFフィルタへの要求

- より広帯域 + より高周波

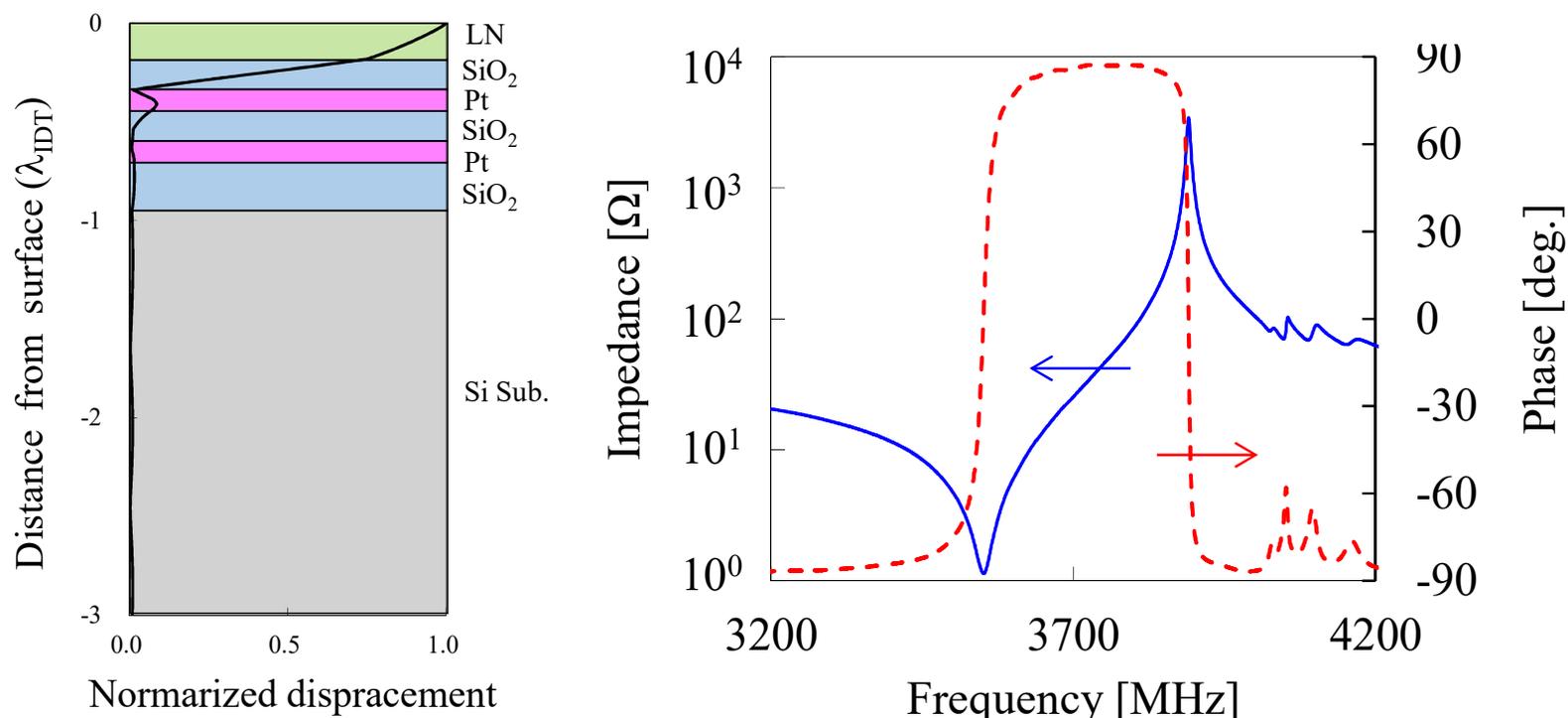
5G用フィルタの一例 Band n77

通過域 3300-4200 MHz

4G用フィルタとの違い

- 超高周波 (通常のSAWの場合線幅 $0.25\ \mu\text{m}$
→ 電気抵抗の増大)
- **超広帯域 (24%)** = 大きな圧電性要
- **耐電力性・非線形性も向上必要**

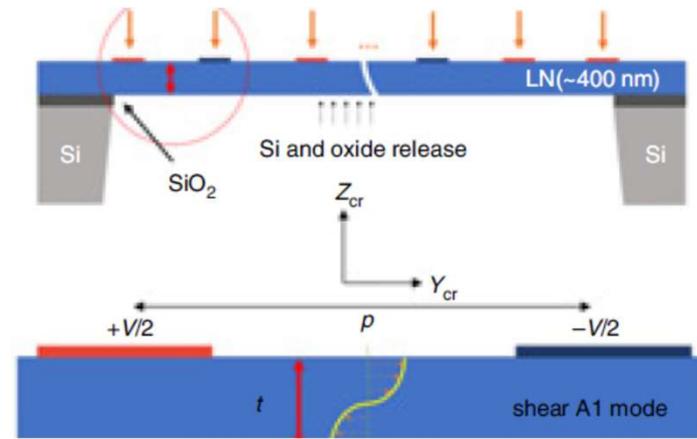
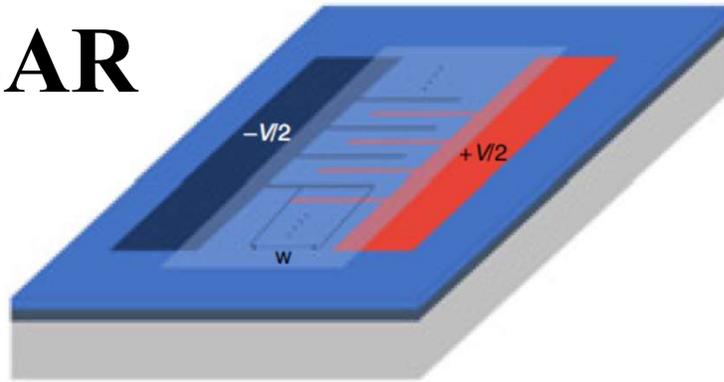
ブラッグ反射器を用いた縦波SAW共振子 (~6,000 m/s)



5 GHz帯への応用も可能 (ただし帯域が。。)

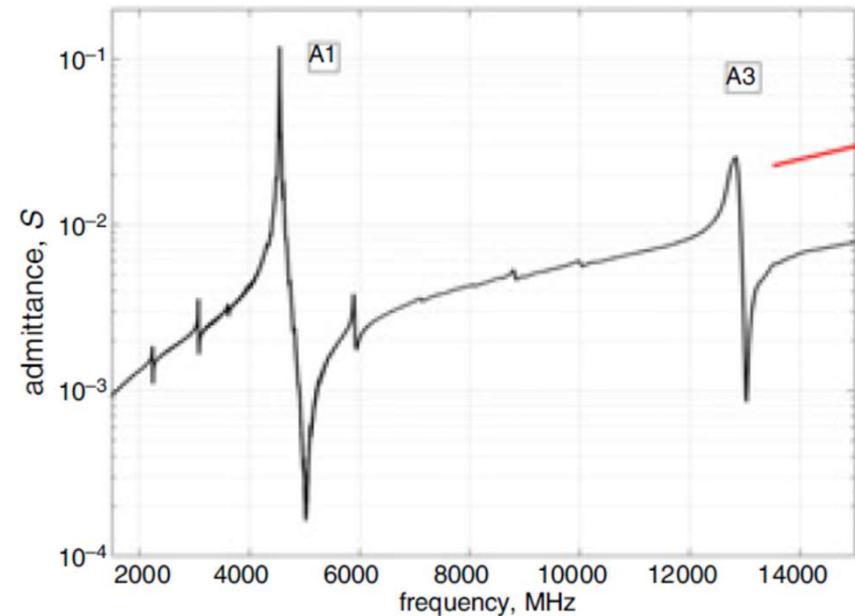
T.Kimura, Y.Kishimoto, M.Omura, and K.Hashimoto, "A 3.5 GHz Longitudinal Leaky Surface Acoustic Wave Resonator Using a Multilayered Waveguide Structure for High Acoustic Energy Confinement," Jpn. J. Appl. Phys., **57**, 7 (2018) 07LD15-1~4

XBAR



LN上のIDT励振の BAW共振子

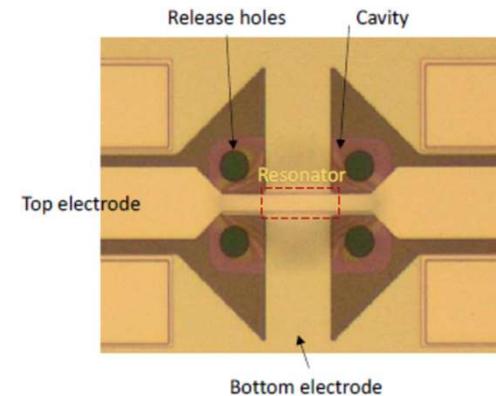
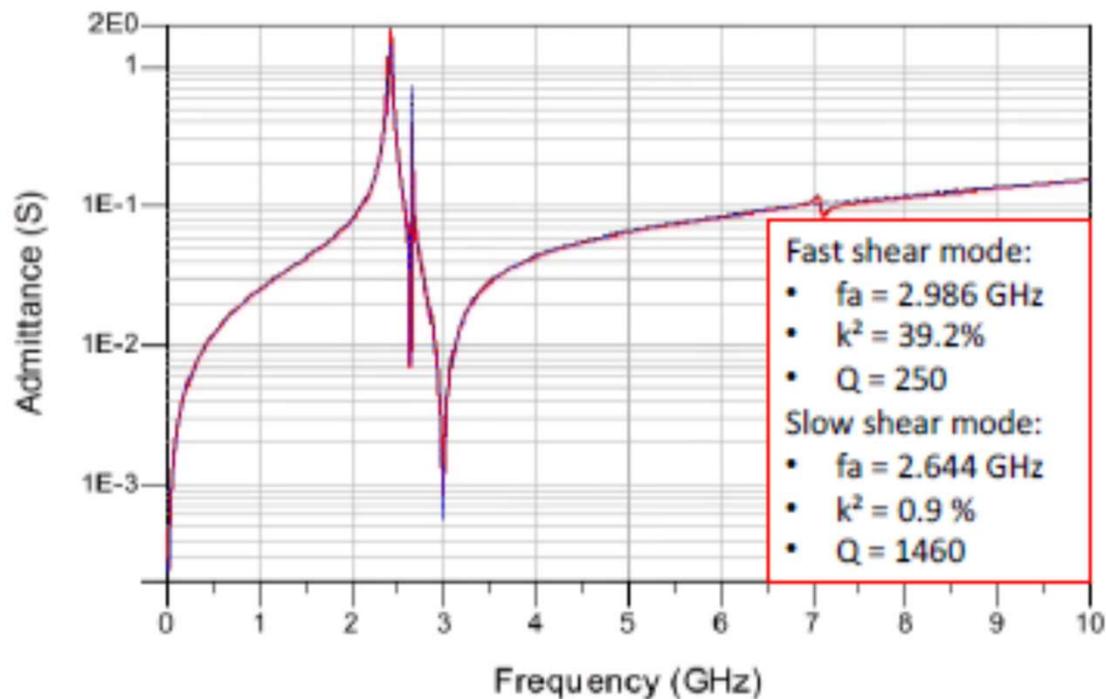
圧電性巨大、製造も
OK(?), 但し脆弱、耐電
力性弱、非線形性は?



V.Plessky, S.Yandrapalli, P.J.Turner, L.G.Villanueva, J.Koskela and R.B. Hammond, “5 GHz laterally-excited bulk-wave resonators(XBARs) based on thin platelets of lithium niobate,” Electronics Letters, **55**, 2 (2019) pp. 98-100

LN薄板上の横波BAW共振子

圧電性巨大、製造もOK(?), 但し脆弱、耐電力性弱、非線形性は？



M.Gorisse, L.Dours, P.Perreau, A.Ravix, R.Lefebvre, G.Castellan, C.Maeder-Pachurka, M.Bousquet, A.Reinhardt, R.Bauder, H.J.Timme, and H.P.Friedrich, "High Frequency LiNbO₃ Bulk Wave Resonator," et al., Proc. IEEE Freq. Contr. Symp. (2019) 10.1109/FCS.2019.8856017

困難なのは百も承知
市場さえ大きければ、何でも可能となる！
エネルギー保存則以外は信じるな！

RFフィルタへの要求

- より広帯域 + より高周波
- より高い耐電力性 + より弱い非線形性
- より良好な温度特性
- より急峻な遮断特性 + より低損失 + より低スプリアス
- より小型・低背・軽量
- より低価格 等等

世の中は要求を満足すれば技術の詳細は不問

講演内容

8. まとめ

研究者・技術者人生で学んだこと

1. 常識は学習すべき。しかし、闇雲に信じるな。全て前提がある。
2. 常識にそぐわないことが発明・発見！
3. 良い結果がでたら、その理由を明確化すること。さらに発展できるかも。
4. 今は駄目なことも理由を理解しよう。今は無理でも将来使えるかも。
5. 生きた情報は現場にあり。論文の序論やマスメディアを鵜呑にするな！
6. 人は財。コネも大事な財産。

孫子の兵法より

1. 凡そ用兵の法は、国を全うするを上と為し、国を破るは之に次ぐ
2. 百戦百勝は善の善なるものに非ず。戦わずして人の兵を屈するは善の善なるものなり
3. 善く戦う者は勝ち易きに勝つ者なり。故に善く戦う者は勝つや、智名なし、勇攻なし
4. 爵禄百金愛みて敵の情を知らざる者は、不仁の至りなり



謝謝
From
Panda
City