

アナログ・デバイセズの 革新的 MEMS スイッチ技術の基礎

著者: Eric Carty、Padraig Fitzgerald、Padraig McDaid
Analog Devices, Inc.

要約

この記事では、アナログ・デバイセズが成し得たマイクロマシン・システム (MEMS) スイッチ技術のブレークスルーについて説明します。アナログ・デバイセズの MEMS スイッチ技術は、従来の電子機械式リレーと比較した場合、RF および DC スイッチの性能および信頼性の向上、そして小型化の面で劇的な進歩を可能にします。

はじめに

過去 30 年間にわたり、MEMS スイッチは、性能に限られた電子機械式リレーに代わる優れたデバイスとして、絶えず喧伝されてきました。そして、0 Hz/DC から数百 GHz までの信号の経路を高い信頼性と最小限の損失で定めることのできる、使いやすく小さいフォーム・ファクタのスイッチを提供することによって、電子システムの実現方法に大きな変革をもたらしてきました。この性能上の利点は、きわめて広範なタイプの装置やアプリケーションに影響を与えます。電気的な試験/計測システム、防衛システム・アプリケーション、ヘルスケア機器などは、これまで不可能であったレベルの性能とフォーム・ファクタを実現できる分野の一部にすぎません。これらはすべて、MEMS スイッチ技術によって可能となります。

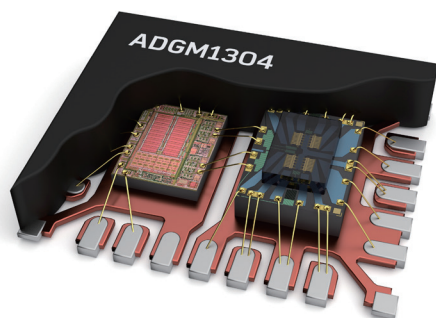


図 1. アナログ・デバイセズの MEMS スイッチ技術

現在のスイッチング技術にはどれも欠点があり、理想的なソリューションといえる技術は1つありません。リレーの欠点としては、狭い帯域幅、短い動作寿命、限られたチャンネル数、大きいパッケージ・サイズなどが挙げられます。MEMS 技術は、リレーより小さいフォーム・ファクタで、卓越した RF スイッチ性能と桁違いの信頼性向上を実現する可能性を持ち続けてきました。MEMS スイッチ技術の開発に挑む多くの企業を阻んできた課題が、信頼性の高い量産品を提供することでした。最初に MEMS スイッチの研究に携わった企業の1つが The Foxboro Company で、同社は 1984 年に、世界初となる電子機械式スイッチの特許の1つを申請しています。アナログ・デバイセズは、1990 年以来、初期の学術的プロジェクトを通じて、MEMS スイッチ技術の研究に関わり、1998 年までに、MEMS スイッチの設計、開発を成し遂げ、これが初期のプロトタイプにつながっています。その後 2011 年、MEMS スイッチ・プロジェクトへの投資を大幅に拡大することにより、自社の最先端 MEMS スイッチ製造施設の建設が進められました。今日のアナログ・デバイセズは、常に必要とされる製品、すなわち旧式となりつつあるリレー技術に代わる、量産が可能で信頼性と高性能を兼ね備えた小型フォーム・ファクタの MEMS スイッチを供給することができます。

アナログ・デバイセズには、MEMS に関する豊かな歴史があります。開発、製造、商品化に成功した世界初の MEMS 加速度センサー製品は、1991 年にアナログ・デバイセズがリリースした **ADXL50** 加速度センサーです。さらに、業界初の集積化 MEMS ジャイロ・センサー **ADXRS150** を 2002 年にリリースしました。これら初期のリリース以降、アナログ・デバイセズは大規模な MEMS 製品事業を築き上げ、信頼性に優れた高性能 MEMS 製品の製造に関して比類のない評価を確立してきました。アナログ・デバイセズがこれまでに出荷した慣性センサーの数は、自動車、工業、コンシューマ・アプリケーション向けに 10 億個を超えます。MEMS スイッチ技術の実現を推進する経験と信念は、こうした歴史によってもたらされました。

MEMS スイッチの基礎

アナログ・デバイセズの MEMS スイッチ技術の中核をなすのは、静電駆動型、マイクロマシン構造で、カンチレバー・ビームを備えたスイッチング素子という構想です。基本的に、このスイッチは、静電気で動作する金属接点を備えた 1 マイクロメートル単位の機械式リレーと考えることができます。

スイッチは3端子構成で接続されます。機能上、これらの端子はソース、ゲート、ドレインと考えることができます。スイッチの動作を視覚的に表したのが図2です。ケースAはオフ位置にある状態を示しています。ゲートにDC電圧を加えると、スイッチ・ビームを下方へ引っ張る静電気力が発生します。これは平行板コンデンサに生じる静電気力と同じもので、正負の電荷が帯電したプレートが互いに引き合います。ゲートの電圧が徐々に増加して十分高い値になると、抵抗となるスイッチ・ビームのスプリング力に打ち勝つだけの十分な引力(赤い矢印)が生じ、ビームが下方へ動き始めて接点がドレインに接触します。この状態を示したのが図2のケースBです。これによってソースとドレイン間に回路が形成され、スイッチがオンの状態になります。スイッチ・ビームを下に引き下げるために実際に必要とされる力は、カンチレバー・ビームのばね定数と動作抵抗の大きさに関係します。オン位置にあっても、スイッチ・ビームには依然として上方のスプリング力(青い矢印)がかかっていますが、下に引いている静電気力(赤い矢印)のほうが大きい限り、スイッチはオン状態を維持します。最後に、ゲート電圧を取り除く、つまりゲート電極の電圧を0Vにすると(図2のケースC)、静電気による引力は消失し、スイッチ・ビームが十分な復元力(青い矢印)を持つスプリングとして作用し、ソースとドレイン間の接続が開いて、元のオフ位置に戻ります。

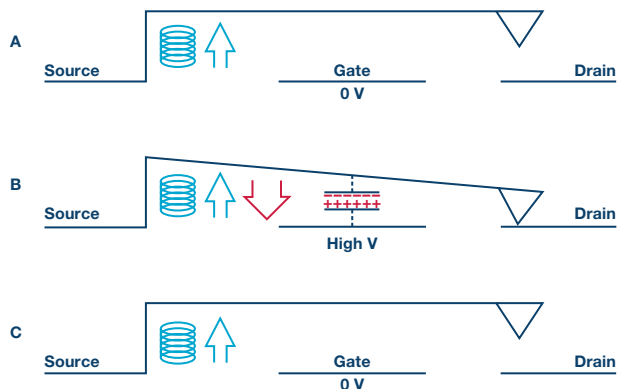


図2. MEMSスイッチの動作プロセス。AとCはスイッチ・オフの状態を、Bはオンの状態を示します。

MEMS技術を使用してスイッチを製造する4つの主要ステップを、図3に示します。スイッチは高抵抗のシリコン・ウェーハ(1)の上に形成しますが、ウェーハの上面には、下側にある基板との電氣的絶縁を確実なものとするために、厚い絶縁層を堆積します。MEMSスイッチとの相互接続の実現には、標準的なバックエンドCMOS相互接続プロセスを使用します。MEMSスイッチへの電氣的接続には低抵抗の金属とポリシリコンを使用し、これを絶縁層に組み込みます(2)。スイッチ入力、スイッチ出力、およびゲート電極からダイ上のあらゆる場所にあるワイヤ・ボンド・パッドへの接続には、赤で示された金属ビア(2)を使用します。カンチレバーMEMSスイッチ自体は、カンチレバー・ビームの下に間隙を形成するための犠牲層を使って、表面にマイクロマシン加工されます。カンチレバー・スイッチ・ビーム構造とボンド・パッド(3)は、金を使って形成します。スイッチ接点とゲート電極は、絶縁体の上に低抵抗の薄い金属膜を堆積させて形成します。

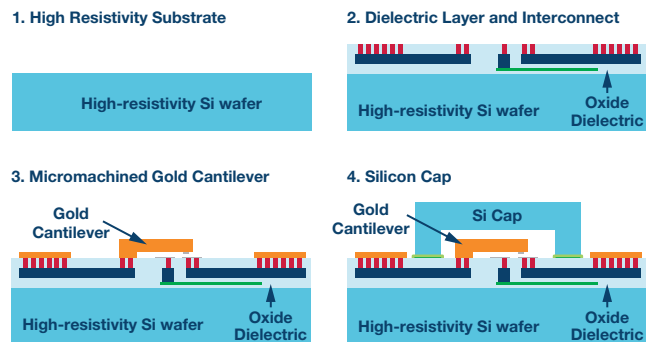


図3. MEMSスイッチ製造の概要

ワイヤ・ボンド・パッドも、上記の手順を使って形成されます。MEMSダイと金属リード・フレームの接続には金ワイヤ・ボンディングが使われ、PCBへの表面実装を容易にするために、プラスチックQFN(Quad-Flat No-leaded)パッケージに封入されます。ダイのパッケージング技術は1種類だけに限定されません。これは、高抵抗のシリコン・キャップ(4)をMEMSダイにボンディングして、MEMSスイッチ・デバイスの周囲に密封された保護ハウジングを形成するためです。

このようにしてスイッチを密封すると、どのような外部パッケージ技術を使用した場合でも、スイッチの耐環境性とサイクル寿命が向上します。

図4に、単極四投(SP4T)マルチプレクサ構成とした4個のMEMSスイッチの拡大図を示します。各スイッチ・ビームには、スイッチを閉じたときの抵抗を小さくして扱える電力量を大きくするために、並列に配置した5個のオーミック電極があります。

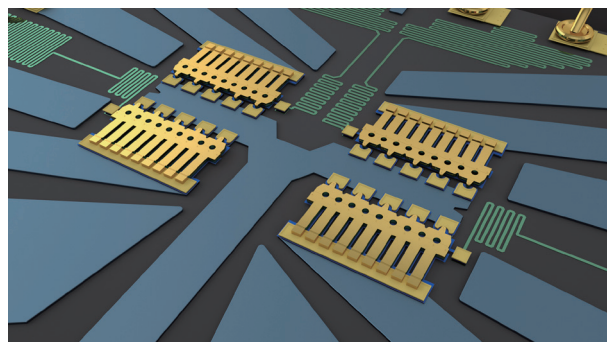


図4. 4個のMEMSカンチレバー・スイッチ・ビームの拡大図(SP4T構成)

冒頭に概要を示したように、静電気力でスイッチを作動させるためには、MEMSスイッチには高いDC駆動電圧が必要です。デバイスをできるだけ使いやすくするとともに、性能を確保するために、アナログ・デバイスでは高いDC電圧の生成用にスイッチと組み合わせて使用するドライバ集積回路(IC)を開発し、QFNのフォーム・ファクタでMEMSスイッチと同じパッケージに封入しました。さらに、生成された高い動作電圧は、制御された形でスイッチのゲート電極に加えられます。この電圧は、マイクロ秒単位で高い値まで引き上げられます。この電圧の上昇は、スイッチ・ビームを引き下げる引力を制御する助けとなり、スイッチの動作、信頼性、サイクル寿命を向上させます。QFNパッケージに組み込んだ状態のドライバICとMEMSダイを図5に示します。ドライバICに必要なのは低電圧と低電流のみで、標準的なCMOSロジックの駆動電圧で動作します。ドライバは同一パッケージに封入されているため、スイッチが非常に使いやすくなり、消費電力も10mW～20mWの非常に低い範囲に抑えられます。

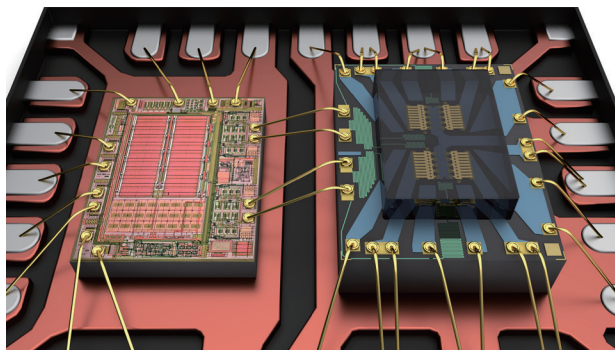


図 5. 金属リード・フレーム上に取り付けられワイヤ・ボンディングされた駆動 IC (左) と MEMS スイッチ・ダイ (右)。

信頼性

新しい技術において重要な原則は、どの程度の信頼性を備えているかということであり、アナログ・デバイスズが特に留意しているのもこの点です。新しい MEMS 技術の製造プロセスは、機械的に堅牢な高性能スイッチ設計の開発を可能にするための基本でした。このプロセスと、密封されたシリコン・キャッピング・プロセスの組み合わせが、真の信頼性を備えた長寿命の MEMS スイッチを提供するうえできわめて重要だったのです。MEMS スイッチの商品化を成功させるには、スイッチ・サイクリング、寿命試験、機械的衝撃試験など、MEMS 固有の広範な信頼性試験が必要でした。このような品質評価に加えて、できる限り高いレベルの品質を保証するために、これらのデバイスについては、標準的な IC 信頼性試験による品質評価が行われてきました。実施された環境試験と機械的試験の概要を表 1 に示します。

表 1. MEMS スイッチ技術の品質評価試験

Test Name	Specification
HTOL 1 kHz, 1 Billion Cycles, 1000 Hours	JESD22-A108
HTOL II Switch Continuously on at +85 °C, 1000 Hours	JESD22-A108
ELF 5 kHz Burst Mode Cycling, 85 °C, 48 Hours	MIL-STD-883, M1015
HAST +130 °C, 85 % RH, Biased, 96 Hours	JESD22-A110
SHR MSL 3 Precondition	J-STD-20
Random Drop	AEC-Q100 Test G 5, 0.6 m
Vibration Testing Cond B, 20 Hz to 2000 Hz at 50 g	MIL-STD-883, M2007.3
Mechanical Shock 1500 g 0.5 ms Vibration 50 g Sine Sweep 20 Hz to 2000 Hz Acceleration 30,000 g	Group D Sub 4 MIL-STD-883, M5005
Temperature Cycle ¹ Cycle per Hour -40 °C to +125 °C, 1000 Cycles	JESD22-A104
High Temp Storage +150 °C, 1000 Hours	JESD22-A103
Autoclave 121 °C, 100 % RH, 96 Hours	JESD22-A102

RF 計測アプリケーションでは、スイッチの動作寿命の長いことが最も重要です。MEMS 技術は、電子機械式リレーより一桁多いサイクル寿命を実現するために開発が行われてきました。このデバイスのサイクル寿命は、85 °C での高温動作寿命 (HTOLI) 試験と初期故障 (ELF) 品質評価試験によって確保されています。

連続オン寿命 (COL) 性能は、MEMS スイッチ技術におけるもう1つの重要パラメータです。例えば、RF 計測におけるスイッチの使用法はさまざまで、長時間にわたってオン位置のままになることもあります。アナログ・デバイスズはこの事実を認識して、MEMS スイッチ技術の寿命関連リスクを軽減するために、優れた COL 寿命性能の実現を重視してきました。アナログ・デバイスズは、50 °C で 7 年間 (故障発生までの平均時間) という初期の COL 性能からさらに技術を高め、クラス最高レベルの 85 °C で 10 年間という COL を実現しました。

MEMS スイッチ技術については、一連の包括的な機械的堅牢性評価試験が行われてきました。表 1 に、MEMS スイッチの機械的耐久性を確認する試験内容を示します。MEMS スイッチ素子はサイズが小さく慣性も小さいので、電子機械式リレーより大幅に堅牢性が向上しています。

注目すべき性能上の利点

MEMS スイッチの重要な強みは、高精度の 0 Hz/DC 性能および広帯域 RF 性能を両立し、リレーよりも高い信頼性を、表面実装型の小さいフォーム・ファクタにまとめている点です。

あらゆるスイッチ技術において最も重要な性能指数は、1 個のスイッチのオン抵抗にオフ容量を乗じた値です。これは一般に RonCoff 積と呼ばれ、フェムト秒単位で表されます。RonCoff が小さくなるとスイッチの挿入損失も小さくなり、オフ・アイソレーションが改善されます。

アナログ・デバイスズの MEMS スイッチ技術のスイッチ・ユニット・セル 1 個あたりの RonCoff 積は 8 未満であり、卓越したスイッチ性能を実現する高品質の技術として位置付けられています。

この基本となる利点は、慎重な設計とともに、優れた RF 性能レベルを実現するために利用されてきました。図 6 は、プロトタイプ QFN 単極双投 (SPDT) MEMS スイッチの挿入損失とオフ・アイソレーションを測定した図です。挿入損失は 26.5 GHz でわずか 1 dB で、さらに 32 GHz 以上に達する帯域幅が QFN パッケージの状態で実現されています。

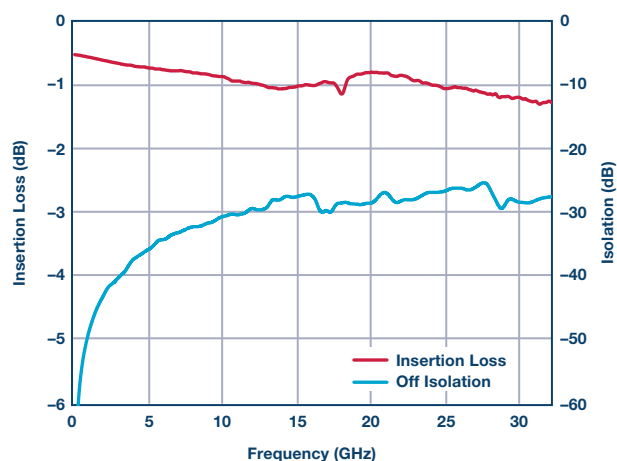


図 6. SPDT MEMS スイッチの性能 (QFN パッケージ)

図 7 は、単極双投 (SPDT) MEMS スイッチ・ダイのプロープ計測により、プロトタイプの実入損失とオフ・アイソレーションをより広い周波数範囲でスイープした結果です。40GHzで、1 dB の実入損失と -30 dB 程度のオフ・アイソレーションを達成しています。

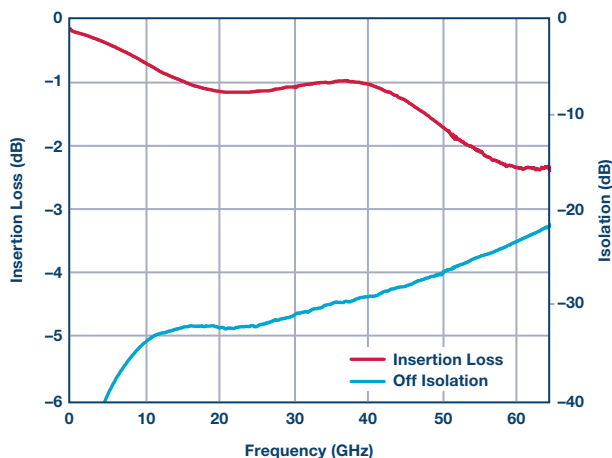


図 7. ダイ・プロープ計測による SPST MEMS スイッチ性能

さらに MEMS スイッチ設計は、本質的に以下の領域においてきわめて高い性能を実現します。

- ▶ 高精度 DC 性能: 2 Ω 未満の R_{ON} 、0.5 nA のオフ・リーク、-110 dBc の全高調波歪み (THD+N) という高精度の性能レベルを達成しており、ビームと基板を最適化すれば、すべてのレベルをさらに向上できる可能性があります。
- ▶ 直線性性能: 27 dBm の入力トーンで、69 dBm を超える 3 次相互変調インターセプト (IP3) を実現しています。全動作周波数帯内で、75 dBm 以上まで値を向上できる可能性があります。
- ▶ 作動寿命: 最小 10 億回の作動サイクルを確保しています。これは、今日市場で入手可能なあらゆる機械式リレーの定格寿命 (通常 1,000 万サイクル以下) をはるかに超える値です。
- ▶ 電力処理性能 (RF/dc): 全動作周波数範囲について 40 dBm を超える電力でテストされており、低周波数域や高周波数域でも性能の低下はありません。DC 信号に関しては、このスイッチ技術は 200 mA を超える電流を通すことができます。

最後に、ソリューションの小型化は、通常すべての市場において求められる非常に重要な条件です。ここでも、MEMS は注目すべき利点を提供します。図 8 は、アナログ・デバイセズのパッケージ化された SP4T (4 スイッチ) MEMS スイッチと、代表的な DPDT (4 スイッチ) 電子機械式リレーを同スケールで比較したものです。容積に関して言えば、省スペース効果は絶大です。この例の MEMS スイッチが必要とする容積は、リレーの 5% にすぎません。この非常に小さいサイズは基板面積の節約を大幅に促進し、特に両面基板の開発を可能にします。この利点は、チャンネル密度の向上が最重要視される自動試験機器のメーカーにとっては、特に有益です。

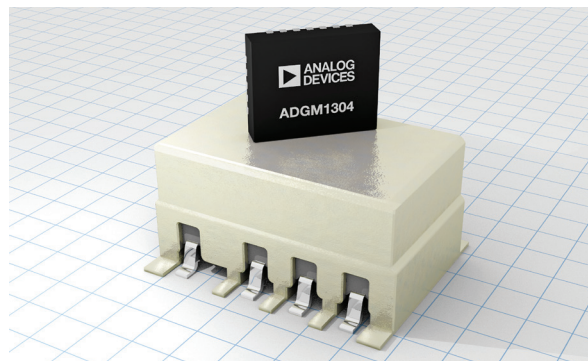


図 8. リード・フレーム・チップスケール・パッケージに入ったアナログ・デバイセズの MEMS スイッチ (4 スイッチ) と代表的な電子機械式 RF リレー (4 スイッチ) の比較

まとめ

アナログ・デバイセズが開発した MEMS スイッチ技術によって、スイッチの性能と小型化を大きく飛躍させることが可能となります。0 Hz/DC から Ka バンドを超える帯域までをカバーするクラス最高の性能、リレーよりも桁長いサイクル寿命、優れた直線性、きわめて低い消費電力、チップ・スケール・パッケージでの提供などにより、アナログ・デバイセズの MEMS スイッチ技術は、アナログ・デバイセズが提供する幅広いスイッチ製品群に新たに革新的な製品を加えます。

新しい MEMS スイッチ製品

ADGM1304

SP4T MEMS スイッチ、0 Hz/DC ~ 14 GHz、ドライバ内蔵

ADGM1004

SP4T MEMS スイッチ、0 Hz/DC ~ 13 GHz、2.5 kV HBM ESD、ドライバ内蔵

参考文献

Carty, E., Fitzgerald, P., Stenson, B., McDaid, P., Goggin, R.: "Development of a DC to K-Band Ultra Long On-Life RF MEMS Switch with Integrated Driver Circuitry.", European Microwave Conference (EuMC), European Microwave Association (EuMA), 4-6 October 2016.

Gabriel Rebeiz. "RF MEMS, Theory, Design and Technology.", Wiley, 2003

Goggin, R., Fitzgerald, P., Stenson, B., Carty, E., McDaid, P.: "Commercialization of a Reliable RF MEMS Switch with Integrated Driver Circuitry in a Miniature QFN Package for RF Instrumentation Applications.", Microwave Symposium (IMS), IEEE MTT-S International, 17-22 May. 2015.

Goggin, R., Wong, J.E., Hecht, B., Fitzgerald, P., Schirmer, M.: "Fully integrated, high yielding, high reliability DC contact MEMS switch technology & control IC in standard plastic packages.", Sensors, 2011 IEEE, pp. 958, 961, 28-31 Oct. 2011.

Maciel, J., Majumder, S., Lampen, J., Guthy, C.: "Rugged and reliable ohmic MEMS switches", Microwave Symposium Digest (MTT), IEEE MTT-S International, 17-22 June 2012.

Rebeiz G., Patel C., Han S., Ko Chih-Hsiang., Ho K.: "The Search for a Reliable MEMS Switch?.", IEEE Microwave Magazine, Jan/Feb 2013.

Stephen D. Senturia, "Microsystem Design.", Springer, 2000.

著者について

Eric Carty. 1998年、アイルランド国立大学メイヌース校で実験物理学の理学修士号を取得。10年間RF受動コンポーネントの設計技術者として設計に従事した後、アナログ・デバイセズ入社。2009年より、アナログ・デバイセズのシニア・アプリケーション・エンジニアとして、RFスイッチとMEMS技術の研究開発を担当。現在、アナログ・デバイセズのスイッチおよびマルチプレクサ・アプリケーション部門マネージャ。

Padraig Fitzgerald. 2002年、リムリック大学を卒業し、電子工学の学士号を取得。アイルランドのリムリックにあるアナログ・デバイセズで、2002年よりソリッドステート・スイッチの評価エンジニアとして業務に従事。2007年、スイッチ設計部門へ異動。コーク工科大学でMEMSスイッチの信頼性に関する研究で修士課程を終了。現在、高精度スイッチ・グループICデザイン・エンジニアのシニア・スタッフとして、MEMSスイッチのデバイス設計に従事。

Padraig McDaid. 1998年、アイルランドのリムリック大学で電子工学の工学士号を取得。アナログ・デバイセズのスイッチ/マルチプレクサ・マーケティング部門のマネージャとしてMEMS技術の研究開発に従事。2009年のアナログ・デバイセズ入社以前は、多国籍企業や中小企業で、RF設計、アプリケーション、マーケティングなどのさまざまな業務を担当。

オンライン・サポート・コミュニティ

当社のオンライン・サポート・コミュニティで、アナログ・デバイセズの技術専門家と連携することができます。設計上の難問について問い合わせたり、FAQを参照したり、話し合いに参加することができます。



ez.analog.com

* 英語版技術記事は [こちら](#) よりご覧いただけます。

アナログ・デバイセズ株式会社

本社 〒105-6891 東京都港区海岸1-16-1 ニューピア竹芝サウスタワービル10F
大阪営業所 〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原3-5-36 新大阪トラストタワー10F
名古屋営業所 〒451-6040 愛知県名古屋市中区牛島町6-1 名古屋ルーセントタワー40F

©2017 Analog Devices, Inc. All rights reserved.
本紙記載の商標および登録商標は、
各社の所有に属します。
Ahead of What's Possible は
アナログ・デバイセズの商標です。

www.analog.com/jp



想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™