

車載用 LIDAR アプリケーションのパッケージング動向

執筆者: Amkor Technology, Inc. Dr. Ajay Sattu, Weiling Lu, Mike Sleiman, Burt Barber

現代の自動車の安全性を革命的に向上させることで、道路交通事故死者数とそれに伴うコストを削減することができます。毎年、世界では約 135 万人が交通事故で亡くなっています。また、これらの事故は、ほとんどの国で国内総生産の 3% を占めています [1]。これらの交通死亡事故の大半はヒューマンエラーが主な原因となっています。米国道路交通安全局 (NHTSA) の 2018 年の年次報告書 (2020 年に公表) によると、米国では約 3 万 4,000 件の衝突事故が死亡事故につながりました。さらに、190 万件的衝突事故が傷害事故を、480 万件的衝突事故が物的損害を生みました [2]。自動車メーカー (相手先商標製品の製造会社 [OEM]) は、無線距離検出 (レーダー)、カメラ、慣性計測ユニット (IMU)、アンチロック・ブレーキ・システム (ABS) などの一連のセンサーを現代の自動車に統合してきましたが、今後も改良を重ねることで、運転作業の自動化がさらに進むこととなります。近年、光距離検出 (LIDAR) 技術は、先進運転支援システム (ADAS) や自律運転 (AD) などの用途への実行可能性を得てきました。車載製品業界が ADAS と AD 機能を搭載した新型車の安全性の限界を押し広げる中で、最先端のソリューションの多様性が有望視されています。ほとんどの OEM やシステム (ティア 1) の供給業者は、堅牢な安全プラットフォームには LIDAR、レーダー、カメラの組み合わせが不可欠であると考えています。

業界動向

SAE International (旧称: Society of Automotive Engineers [SAE]) によると、自動車の自動運転能力はレベル 0 からレベル 5 まで定義できます。SAE J3016 規格による各種レベルの全般的な説明とガイドラインを図 1 に示します。これらのレベルのそれぞれが可能にする主要なドライバー支援機能のいくつかを以下に説明します。例えば、レベル 1 では自動緊急ブレーキ (AEB) や車線逸脱警報システム (LDWS) などの機能を、レベル 2 ではさらにレーンキーピングアシスト (LKA) やアダプティブクルーズコントロール (ACC) などの安全オプションを可能にしています。レベル 2 の車両では、ある程度の長時間、ドライバーがハンドルから手を離し、ペダルから足を離すことができ、部分的な自動化が可能になります。レベル 2 の機能は、特定の運転に介入することができますが、ドライバーは運転環境に注意を払い続ける必要があります。このように、車両が部分的な自動化から条件付きの自動化に移行する際に、レベル 3 を実現するための大きな課題が残っています。

| | | SAE LEVEL 0 | SAE LEVEL 1 | SAE LEVEL 2 | SAE LEVEL 3 | SAE LEVEL 4 | SAE LEVEL 5 |
|--|--|---|---|---|---|--|---|
| What does the human in the driver's seat have to do? | | You are driving whenever these driver support features are engaged - even if your feet are off the pedals and you are not steering | | | You are not driving when these automated driving features are engaged - even if you are seated in "the driver's seat" | | |
| | | You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety | | | When the feature requests, you must drive | These automated driving features will not require you to take over driving | |
| What do these features do? | | These are driver support features | | | These are automated driving features | | |
| | | These features are limited to providing warnings and momentary assistance | These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver | These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver | These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met | This feature can drive the vehicle under all conditions | |
| Example Features | | <ul style="list-style-type: none"> automatic emergency braking blind spot warning lane departure warning | <ul style="list-style-type: none"> lane centering OR adaptive cruise control | <ul style="list-style-type: none"> lane centering AND adaptive cruise control at the same time | <ul style="list-style-type: none"> traffic jam chauffeur | <ul style="list-style-type: none"> local driverless taxi pedals/steering wheel may or may not be installed | <ul style="list-style-type: none"> same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions |

図 1.SAE の自律走行レベル 出典 : SAE International

レベル 3 の車両では、ドライバーから機械への移行に合わせて、渋滞運転支援機能 (TJA) やドライバーモニタリングシステム (DMS) などの機能が利用できるようになります。レベル 2 とは異なり、レベル 3 では周囲の監視作業の負担は車両のセンサースイートが負うようになっていきます。しかしながら、業界では 2+ と呼ばれる中間レベルを定義しているように、レベル 2 からレベル 3 への移行は細分化されてきました。レベル 2+ は、最適な運転条件とそうでない運転条件の両方の視点における高精細な予測マップを提示します。本質的には、レベル 2+ は、特に車線がない場合や不慣れた運転目的地で、車両の進路に対する理解度を高めてくれます。レベル 3 を超えて、ADAS レベル 4 と 5 では、高速道路やあらゆる場所でのオートパイロット (AP) が搭載され、ロボット車両には不可欠な高度で完全な自動化機能が搭載されることとなります。

現在製造されている車両のほとんどはレベル 0 ですが、今後は図 2 のようにレベル 1 以上の採用が増えていくと予想されます。例えば、2019 年に販売された新車のうち、6 台に 1 台がレベル 2 以上の機能を搭載していました。しかしながら、10 年後には 2 台に 1 台近くがレベル 2 以上になると予想されています。多くの OEM の代表的なアプローチは、複数のレーダーやカメラセンサーを使用してレベル 2 を実現することでした。今後は、レーダーやカメラセンサーのみだと、レベル 3 以上のレベルを可能にするには不十分になる可能性があります。LIDAR などの他のセンサーは、レーダーやカメラと補完関係にあるため、注目を集めています。図 3 は、これらのセンサーのそれぞれが、類似の条件下でどのように相互に比較されているかを包括的に示しています。

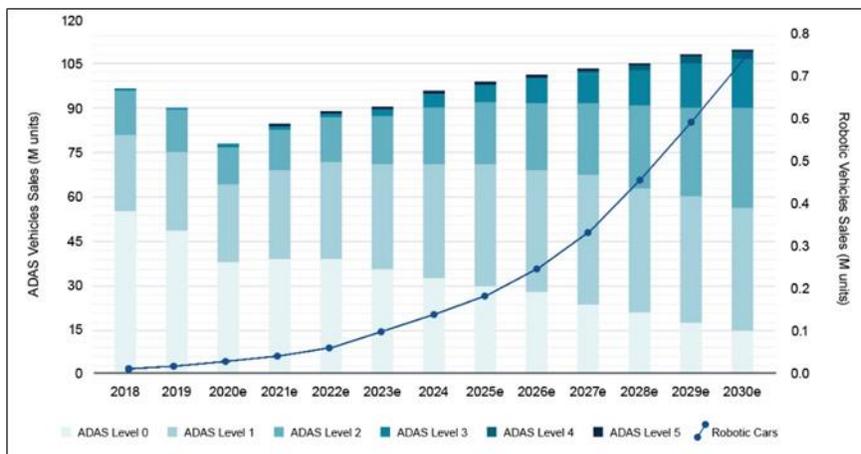


図 2.軽自動車の予測と ADAS レベル 出典：Yole, IHS Markit

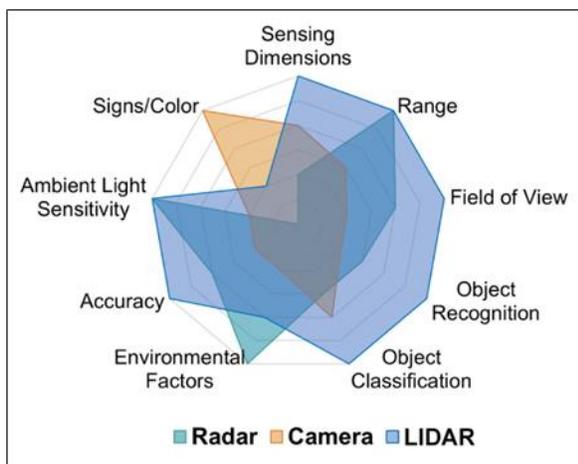


図 3.レーダー、カメラ、LIDAR の相対比較 出典：Quanergy, Velodyne

カメラは、取得した画像の画像処理のために、多くの計算能力を必要とします。一方、LIDAR センサーはアナログ検出や統計的手法を利用して点群画像を生成しています。そのため、LIDAR では計算サイクル数が少なく済みます。LIDAR センサーはカメラよりも範囲、解像度、精度が優れていますが、LIDAR はカメラのように道路交通標識や異なる色を認識する能力を持っていないため、カメラの代わりにはなりません。そのかわり、LIDAR とカメラセンシングは、ADAS システムとして既に普及しているレーダーを使用することでメリットを得ることができます。例えば、雪によってカメラセンサーの動作が損なわれたり、天候によって伝搬媒体の屈折率が変化して LIDAR の検出可能な範囲が狭くなったりすることがあります。

LIDAR センサーの展望

基本的な運転を把握するにあたり、LIDAR センサー市場は、測定技術、エミッタソース、検出器、ビームステアリングの 4 つのセグメントに大別することができます。測

定の観点からは、飛行時間 (ToF) と周波数変調連続波 (FMCW) の 2 つの主要なアプローチが追求されています。ToF では、パルスの送信時間と到達時間の差を決定して範囲を測定します。このようなシステムで使用されるパルスは、非常に高出力でありながら、パルス幅が狭い傾向にあります。検出可能な範囲は、パルスのピークパワーに比例します。この測定技術では、物体の範囲は測定できますが、速度は測定できません。

ToF では、特に明るい条件では信号対雑音比 (SNR) の問題が大きくなります。現在の ToF システムでは、受信機の感度により、多くの場合 100~200m の範囲に制限されます。一方、FMCW は、この技術がレーザーのピークパワーではなく、透過光子の数に依存しているため、SNR の問題には比較的影響しません。さらに、コヒーレント検出の性質上、信号処理のために関連する波長のみが増幅されます。FMCW は、比較的低電力で物体の範囲と速度の両方を検出することができます。

エミッタ技術の面では、コスト、性能、システムレベルでの統合性に優れているため、ファイバーレーザーや他タイプのレーザーよりもレーザーダイオードが好んで使用されています。よく使われているレーザーダイオードの中でも、エッジ発光レーザー (EEL) と垂直共振器面発光レーザー (VCSEL) が広く検討されています。EEL は側面から光が出ているため、アレイというよりは分散素子としての方が適しています。しかしながら、より広い視野 (FoV) とより長い範囲のためには、高ピークパワーで動作するディスクリットダイオードやエミッタよりもアレイの方が好ましく、その結果、冷却システムのコストが高くなることがよくあります。一方、VCSEL はトップエミッション方式のため、アレイとして製造することができます。VCSEL 技術は新たな領域ですが、車載アプリケーションへの採用に伴い、コスト/ワットの改善が期待されています。射距離は EEL 光源から最大 500m とされていますが、ビームが楕円形のため照明には不向きです。VCSEL の使用可能範囲は、EEL と比較してタイトなビーム形状で 300m まで可能です。最後に、発光波長は、エミッタ源で考慮すべきもう一つの重要な要素です。最大許容被ばく量という意味では、現在使用されているエミッタのほとんどは 905nm の近赤外 (NIR) であり、高出力になれば人間の目にとって安全とは言えません。この懸念があるため、およそ 1550nm 波長の短波長赤外線 (SWIR) のエミッタは、目への安全性が向上したことで注目を集めています。

受光側では、戻り光を効果的に捕捉し、アナログ検出や統計的検出で処理するために FoV が不可欠です。光検出器の活性領域、レンズの焦点距離、光バンドパスフィルタの配置によって FoV が決定されます。原則的には、より広い FoV が好ましいですが、そのためにはより大きなチップのフォトディテクターを必要とし、その結果、より高い端子容量とより高いノイズが生じます。現在 LIDAR で使用されている受光器には、フォトダイオード (Pd)、アバランシェフォトダイオード (APD)、シリコン光電子増倍管 (SiPM)、シングルフォトンアバランシェダイオード (SPAD) など、さまざまな種類があります。NIR エミッタとペアになった受光器はシリコンベースなので、コストは問題になりません。しかしながら、SWIR 受光器はシリコンをベースにしておらず、比較的高価であるため、波長 1550nm 付近ではシステムコストが高くなります。これらの受

光器でも感度や赤外検出能力は問題ありませんが、SiPM や SPAD の方がゲインは高いです。効果的な受光のためには、集光レンズの絞りを大きくするか、受光感度の高い受光器を使用しないと、受信信号のパワーを上げることができません。もう一つの課題は、日中は太陽の波長、夜間は街灯やヘッドライトの波長で動作する必要があるバンドパスフィルターの設計です。その結果、アナログ検出にはまだまだ課題が多い状況です。設計者の中には、SPAD が受信パルスとヒストグラム拡張の原理で動作するため、SPAD を使用する統計的検出を選択している人もいます。

最後に、現在実装され研究されている主要なビームステアリング技術（図 4 に示す）には、機械式、微小電気機械システム（MEMS）、フラッシュ、光フェーズドアレイ（OPA）などがあり、参考資料[3]で詳しく説明されています。機械式の LIDAR は、今日では主にロボットカーに使用されています。これらは、複数のレーザーや 360°回転させる検出器を備えたマルチチャンネル装置です。機械設計は嵩張り、コストが高く、見た目の問題もあり、軽自動車での実装が限定的になっています。MEMS LIDAR は、照明中にレーザービームを操舵するシリコン上のアクチュエータと一体化した顕微鏡ミラーを使用しています。これらの設計は機械的な LIDAR に比べて比較的安価ですが、あらゆる地形条件で使用するには信頼性に不安が残ります。フラッシュ LIDAR では、全領域をスキャンするのではなく、レーザービームが全方向に一斉に照射されます。このような LIDAR には可動部がないため、車載製品での使用ケースで信頼性が向上します。画像を形成するためには、検出器の配列が必要です。フラッシュの概念を少し変えたものとして、シーン全体を一斉に照明するのではなく、列ごとに照明するシーケンシャルフラッシュがあります。最後に、OPA は、レーザーアレイの位相を制御することで、照明を操縦します。フラッシュ LIDAR と同様に可動部がないため、OPA は信頼性も高いです。

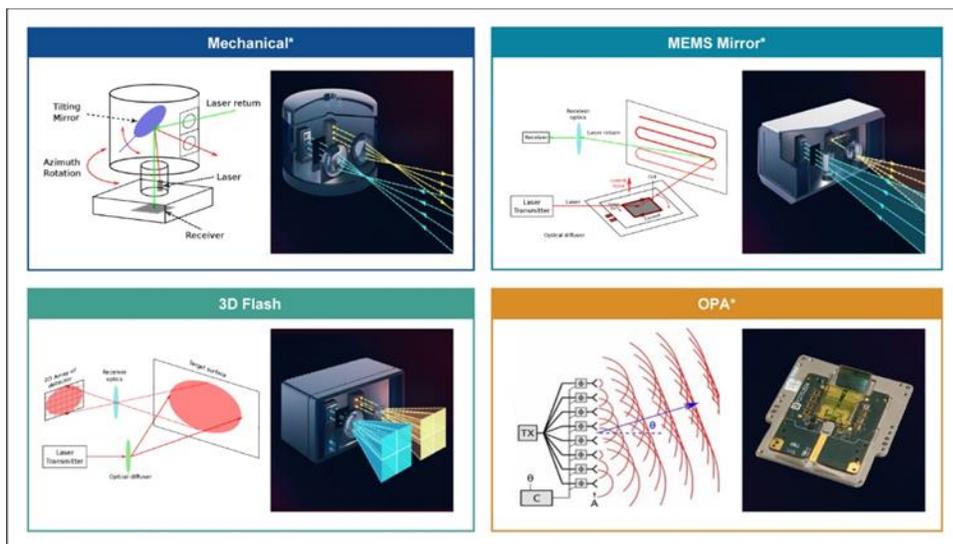


図 4.LIDAR のビームステアリング技術[3] (* スキャンのメカニズムを示す)

パッケージングソリューション

LIDAR に対する政府の規制がないため、自動車 OEM は自律走行の安全性を確保するために冗長化の道を選択してきました。カメラ、レーダー、LIDAR は互いに補完し合うだけでなく、図 3 に示すように、いくつかのアプリケーションで競合することもあります。弊社は、ADAS 市場の新たな LIDAR センサー向けにパッケージソリューションを提供いたします。LIDAR のお客様のご要求は様々であるため、市場は非常に断片化されたソリューションで構成されています。しかしながら、今日では、車載製品などのマスマーケット向けには、スケールメリットがなく本質的に高価な既存技術を使用しているため、LIDAR システムのコストは高くなっています。機械式 LIDAR のコスト内訳の一例を図 5 に示します。IHS Markit によると、64 チャンネルスキャンを搭載した機械式 LIDAR システムのコストは、2025 年までに 800 ドル以下の価格帯に達する可能性があると予測されています。もし実現すれば、レベル 4 以上の ADAS 機能を持つモビリティ・アズ・サービス (MaaS) に焦点を当てた OEM にとって、LIDAR モジュールのこのような価格帯は手頃なものになるかもしれません。個人使用の車両の場合は、より安価な LIDAR ソリューションが好ましいと言えます。

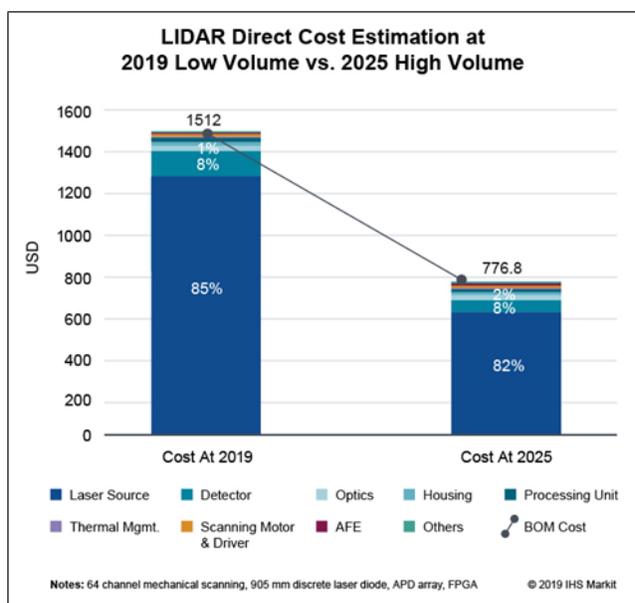


図 5. LIDAR のコスト内訳と傾向 出典：IHS Markit

半導体後工程受託企業 (OSAT) として、弊社は知識と規模の経済性を活かし、費用対効果の高いソリューションを提供しています。例えば、弊社の MEMS センサープラットフォームにより標準化されたプロセスフローを使用することで、コスト削減を実現しています。キャビティボールグリッドアレイ (BGA) / ランドグリッドアレイ (LGA) やモールドキャビティ BGA/LGA の標準化パッケージは、生体認証、車載製品、ヒューマンインターフェース、環境、ヘルスケア/フィットネスなど、多くの市場カテゴリーをターゲットにすることができます。標準化により、市場投入までの時間を短縮するこ

とも可能です。現在のレーザーダイオードと検出器のパッケージのほとんどは、高コストのセラミック基板を使用していますが、ラミネート、リッド、モールドコンパウンドのサプライヤーの継続的な開発のおかげで、低コストソリューションのために品質と性能を確保することができます。コスト削減と機能向上のための手段をさらに理解するためには、LIDAR システムの構成要素を理解する必要があります（図 6）。現在の LIDAR システムの構成要素には、エミッタ、反射光を捕捉するための検出器、信号を処理するための特定用途向け集積回路（ASIC）、およびデータを解析するための処理ユニットが含まれます。今日のソリューションのほとんどはディスクリットフォームですが、複数のチップを 1 つのパッケージに統合したり、1 つの基板上に複数のパッケージ部品を搭載したりすることが将来的な動向になる可能性があります。

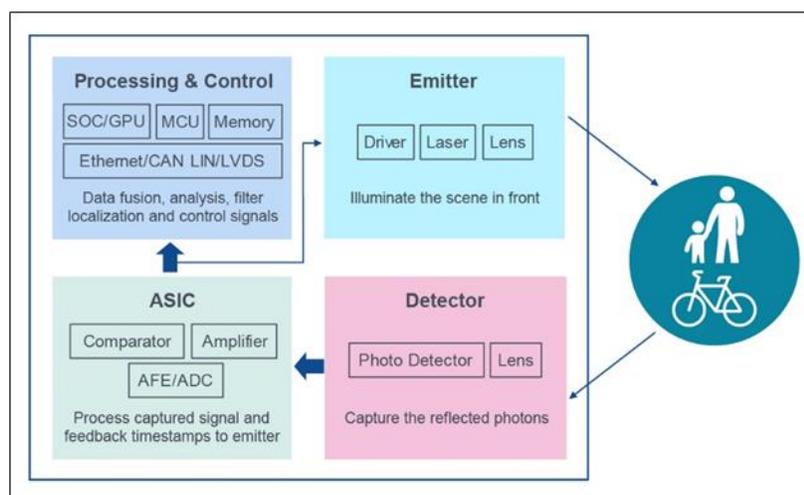


図 6.LIDAR の構成要素出典：IHS Markit

システム・イン・パッケージ（SiP）モジュールが他の車載アプリケーションやインフォテインメントなどのアプリケーションで成功を収めていることから、LIDAR パッケージソリューションがどのように統合されるか、また統合傾向の可能性があるのかという疑問が生まれています。例えば、統合 APD とトランスインピーダンスアンプ（TIA）、または ASIC との統合 SPAD は、サイドバイサイド配置、またはチップオンウェハ（CoW）ソリューションとしてパッケージ化することができます。さらに、デジタル信号処理（DSP）チップは、プリント回路基板（PCB）またはモノリシックシステムオンチップ（SoC）検出器ソリューション上のハイブリッドソリューションによって共同統合することができます。どちらも一長一短があります。例えば、モノリシックソリューションは、NIR 感度が低く検出速度が良いのに対し、ハイブリッドソリューションは、NIR 感度が高く口径比が良いのが特徴です。特に検出可能範囲の ToF アプリケーションでは低インダクタンスが優先されるため、高出力のショートパルスが要求され、ロングリードのスルーホールレーザーパッケージ（高インダクタンス）から、レーザーダイオードのアレイを備えた表面実装パッケージへの移行が鍵となります。ビームの品質は、パッケージの電氣的損失の低減に大きく依存するもう一つの要件です。正しい解決策を見つけるために、光学式指紋センサーと MEMS センサーの実績のある技術成果を活用して、

LIDAR のお客様に対し改善されたパッケージングソリューションを提供することができます。

さらに、モールドキャビティ型指紋センサーパッケージング（図 7、構造 A と B）は、車載電子部品評議会の AEC-Q100 グレード 2 仕様に従って、車載製品アプリケーションへの適合性が認められています。車載製品グレードのパッケージは、コンシューマー向けの指紋センサーよりも厳しい要件を満たす必要がありますが、弊社は標準化されたプロセスを使用して、車載製品用 CMOS イメージセンサー、ToF、LIDAR アプリケーションに特化した適合性が認められました。現在のモールドキャビティ構造は、ワイヤボンドの代わりにフリップチップ/Cu ピラーボンド、BGA の代わりに LGA、アプリケーションに応じてガラス接着エポキシの種類を変えるなど、お客様のニーズに合わせて変更することができます。

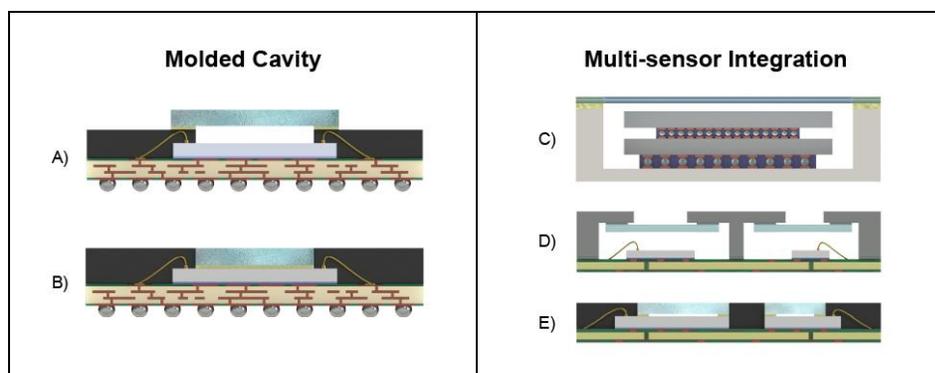


図 7.Amkor のパッケージングソリューション

上記の考察の一例として、ジェスチャーコントロール用の車内の ToF センサーは、極度に鮮明で正確な画像までは必要としない場合があるので、エアギャップの必要性を無くし、透明ダイアタッチフィルム（DAF）でガラスを貼り付けることで、パッケージ内の圧力を低減することができる場合があります。図 8 は、赤外スペクトル（波長 770～1000nm）において 93% 以上の透明度を提供する透明 DAF 溶液接着剤の異なる波長における透明度を示します。構造 B（図 7）は透明 DAF を使用してガラスを貼り付け、構造 A は紫外線（UV）硬化型エポキシを使用してガラスを貼り付け、エアギャップを形成しています。UV 硬化型エポキシは、熱硬化エポキシで増加するキャビティ内の圧力上昇を緩和します。類似の技術を活用することで、複数のセンサーを 1 つのパッケージに統合し、将来に向けて進化し続けることができます。図 7 に示すように、構造体 C、D および E は、上にチップ溶液を積層したセラミック基板を含むコンボセンサー用の 3 つの異なる溶液を示します（構造体 C）。長距離 LIDAR の平均出力は約 12～25W と高いため、トップソリューションのようなセラミック基板が必要になる場合があります。トップソリューションは、よりよい熱性能と最小限の反りを実現するため、大量の熱が発生する多くの ToF アプリケーションにも最適です。構造物 D と E は、両方ともラミネート基板とのワイヤボンド接続を利用しています。一方は成形液（E）を利用し、他方は液晶ポリマー（LCP）のリッド（D）を使用している点が異なります。両ソリューシ

ョンとも低消費電力アプリケーションに最適です。この例としては、代表的な出力が6W未満の短距離 LIDAR が挙げられます。これらのパッケージは、サプライチェーンやお客様との戦略的なパートナーシップにより、低コストで高品質な LIDAR ソリューションを市場に出すことができます。

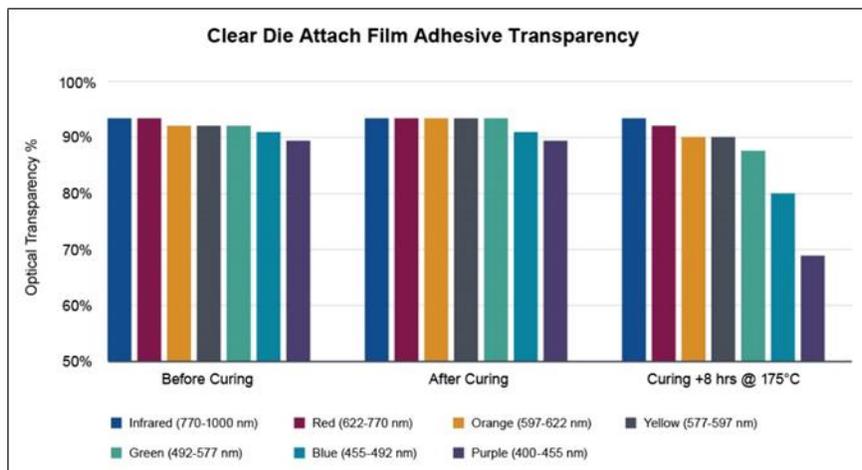


図 8. クリアなダイアタッチフィルムの透明度スペクトル 出典：Loctite, Henkel Adhesives

サマリー

環境、経済、社会的要因により、洗練された車載製品の安全ソリューションの需要が増加してゆきます。手頃な価格での安全性確保のため、ADAS 用の主要コンポーネントとして LIDAR の開発が進められています。弊社は、カメラ、レーダー、LIDAR など、ADAS の各セグメントに対応したパッケージソリューションを提供できる体制を整えています。世界の様々な地域にある製造拠点を利用して、車載製品、産業、コンシューマー向けのアプリケーションにおいて、戦略的に世界中のお客様にサービスを提供しています。LIDAR ブロックの光検出器部分に既存のポートフォリオからパッケージを提供することに重点を置いています。LIDAR が費用対効果の高いソリューションへと進化し続ける中で、単一のパッケージ/モジュールへの統合をさらに促進するセンサーインパッケージ (エミッタとレシーバ) の形での革新的なソリューションを開発していきます。今後は、これらの課題を解決するための高度なソリューションを提供するために、弊社は、技術ノウハウをさらに強化し、お客様とのパートナーシップを深めていきたいと考えています。

参考資料

[1] 道路交通事故死傷者」世界保健機関、<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>

[2] 交通安全の事実の年次報告表」NHTSA、<https://cdan.nhtsa.gov/tsftables/tsfar.htm>

[3] Y. Li, J. Ibanez-Guzman et al., “Lidar for autonomous driving: the principles, challenges, and trends for automotive Lidar and perception systems,” IEEE Signal Processing Magazine、第 37 卷、発行: 2020 年 7 月 4 日。

人物紹介

Ajay Sattuは、Amkor Technology, Inc.の車載製品マーケティング担当シニアマネージャーです。彼は、車載製品の電動化、ADAS、インフォテインメント製品のマーケティングと戦略を担当しています。Amkorに入社する前は、Infineonでワイドバンドギャップ半導体の技術および製品開発を管理していました。複数の査読済み記事を発表し、業界の会議で発表しています。彼は、サウスカロライナ大学で電気工学の博士号を取得し、UCLAアンダーソンでMBAを取得しています。メールアドレスは ajay.Sattu@amkor.com

Burt Barber は、Amkor Technology, Inc. の MEMS およびセンサーのコンサルタントです。グローバルな半導体サプライチェーンで 20 年以上の経験を持ち、MEMC/Sun/Edison、Texas Instruments、Alcatel、Xilinx、日立セミコンダクタで、さまざまなマーケティングおよびビジネス／製品開発の要職を歴任してきました。サンタクララ大学で電気工学の理学士号を、サンフランシスコ大学で MBA を取得しています。