

UV-LED 硬化システムの最新動向

ファインセンシング株式会社

1. はじめに

1992年に紫外線(UV)を発光するLED が初めて実験室で実現し、2000年以降UV-LED 硬化装置の実用化の試みが始まったものの、実用機が登場したのはここ数年である。UV-LED は、点灯/消灯を迅速に行え、高効率で、10万時間の寿命が期待され、有害なオゾン発生がなく、環境負荷物質である水銀も用いず、照射器が小型軽量になり、量産による大幅なコスト低減が可能であるなど、UV ランプが抱える様々な問題を解決する最新技術として、多大な期待を持って歓迎されている。

一方UV 硬化材料は2000年頃には根本的な技術が確立しており、UV 硬化材料は基本的に、酸やラジカルの発生剤、及び重合基を備えたモノマーやオリゴマー溶液から構成される¹⁾²⁾³⁾。UV-LED 硬化に適した材料として、酸/ラジカル発生剤を分子内に組み込んだものも市場に登場してきているが、現時点では相対的に高価で、取扱いが難しい面があり、主にそれらの解決に力が注がれている。

現在のところ、UV-LED 硬化システムは、必ずしも市場の期待を完全に満足させるには到っておらず、またUV-LED は依然として高価な部品である。LED がUV ランプを完全に置き換えるのはもう少し先のことであるが、UV-LED 硬化装置や硬化材料の基本技術がようやく出揃い、市場の期待感という追い風をうけて、その普及に向けた動きが始まっている。本稿では、UV-LED の基礎知識、UV-LED 硬化の特性、LED 劣化機構を説明した上で、UV-LED を硬化システムの現状および最新動向を紹介する。

2. UV-LED の基礎知識

紫外線は電磁波の一種であり、図1に示すように、その波長により真空紫外、UVC、UVB、UVA、UVV に分類される。LED は半導体材料技術および製造技術に大きく依存し、LED 開発は発光波長の短波長化と発光効率の向上の歴史である。UV-LED は最先端技術であり、1例として395nm のUV-LED の強度(W/cm²)は近年のめざましい増加を図2に示す。今日ではUV-LED を含めて様々なLED が市場で入手可能になっている(図3)。

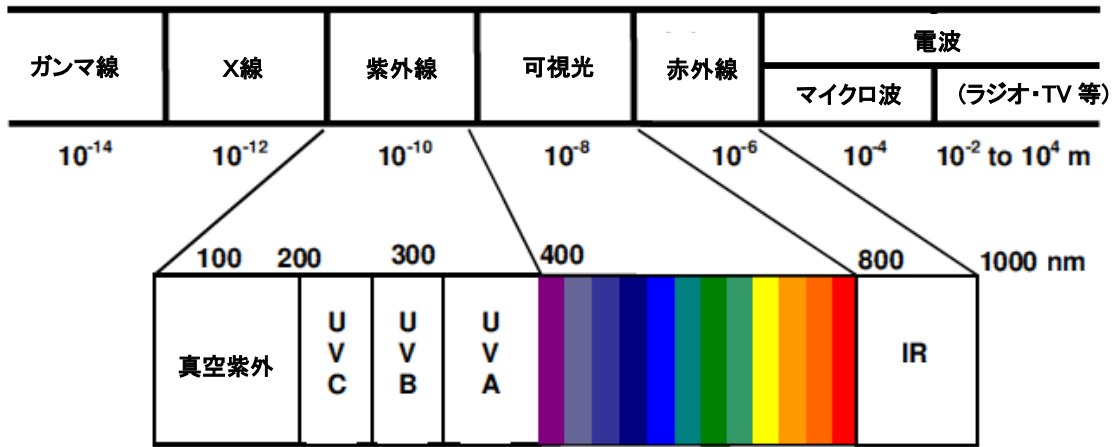


図1 電磁波のスペクトル

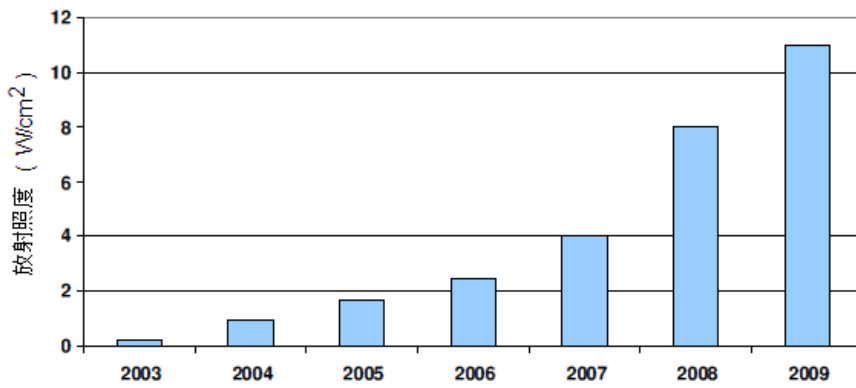


図2 395nm LEDの強度増加傾向 (年々めざましく増加している)

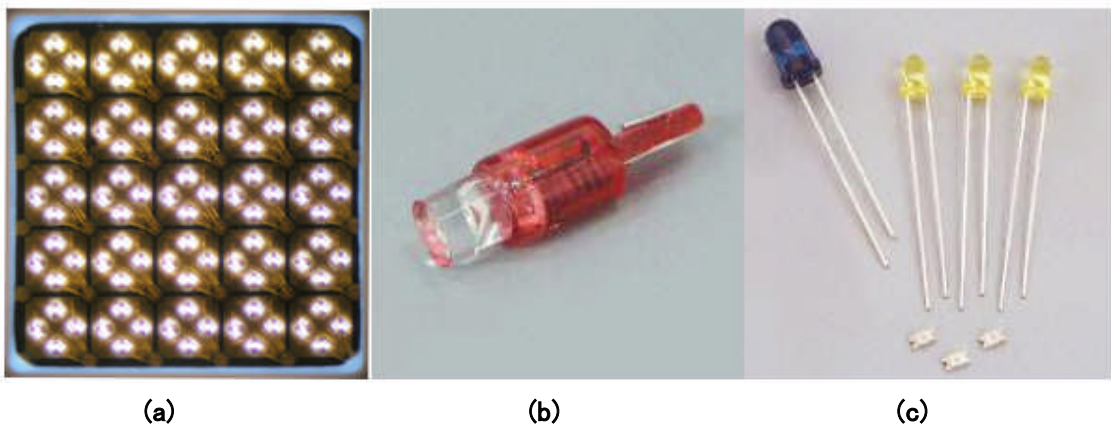


図3 各種LED: (a) UV-LED、(b) 可視光LED、(c) 赤外LED

UV-LED の特性

LED は順方向電流を流すと発光する半導体素子である。LED (Light Emitting Diode: 発光ダイオード)は、その名が示すようにp型半導体とn型半導体が接合したダイオード構造を有しており、pn接合付近で光が発生する。そのメカニズムの詳細は専門書⁴⁾⁵⁾に譲るとして、UV-LED の重要な特性を以下に述べる。

- ① LED の発光原理は半導体のバンドギャップ間のキャリア再結合によるもので、バンドギャップに相当する波長を中心として狭い波長域の光が発生する点が大きな特長である。
- ② UV-LED の発光スペクトルは狭く(図4)、長波長の赤外線(熱線)の放射はない。UV-LED は UV ランプのような熱放射の問題を原理的に持たない。
- ③ LED は光だけでなく熱も発生させる。投入パワー(W)に対して得られる発光パワー(W)の割合を発光効率と言う。特に高出力 UV-LED は発熱が顕著であり、現状では発光効率は 20%以下である。
- ④ LED の過度な発熱は寿命を著しく短くする。現時点では高出力 UV-LED は冷却手段が不可欠である。
- ⑤ プランクの放射則からも明らかなように、UV-LED チップ自体の発熱は硬化材料を加熱するような赤外線放射を伴わない。
- ⑥ UV-LED は、電流の ON/OFF に対して高速に応答して点灯/消灯し、寿命への影響はない。UV アークランプのように常時点灯させておき、機械的シャッター機構により点灯・消灯を行う必要はない。

UV-LED の発光スペクトル

UV 硬化用に入手可能な高出力 UV-LED の中心発光波長は 365nm、375nm、385nm、395nm、405nm である。図4に、これら5つの UV-LED の発光スペクトルと併せて UV ランプの発光スペクトルを示す。UV ランプは 200nm から 445nm におよぶ広い波長域の発光スペクトルを示す。これに対して UV-LED は狭い発光スペクトルを有している。

ここで、UV ランプに比べて UV-LED の発光ピーク強度が非常に大きいことは興味深い。図4に示す UV ランプの 365nm のピーク強度は 2W/cm² 程度、一方 395nm や 405nmLED のピークは 10W/cm² であり、UV ランプのピーク強度の5倍に達する。

UV-LED の普及が先に始まりつつあるのが UV インクジェット印刷であるが、興味深いことに日本国内では 385nm が最もよく用いられる。一方北米やヨーロッパでは 395nm が主流であり 385nm では硬化が遅いとの認識が広まっている。

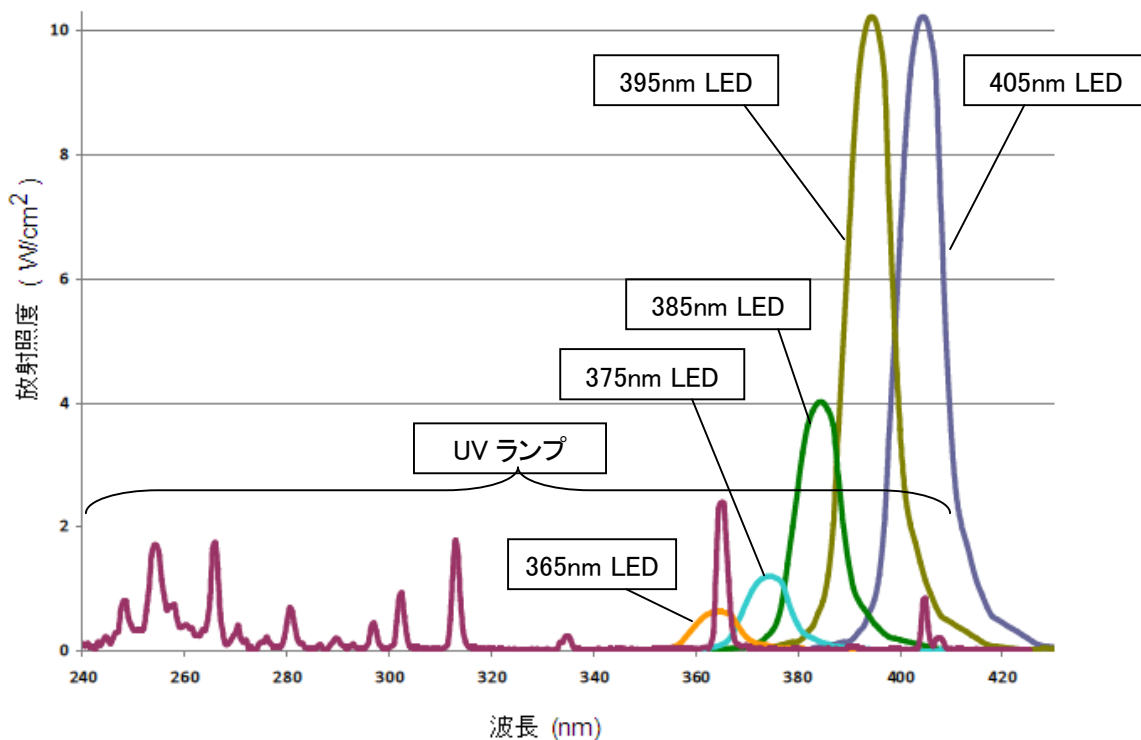


図4 UV ランプと UV-LED の代表的な出力スペクトル特性

3. UV-LED 硬化の特性

UV-LED 硬化システムにおいて、同じ強度 (W/cm^2) でも長時間照射すれば硬化は進む。つまり、強度は UV-LED の能力の指標の1つであるが、硬化能力の指標にならない点に留意すべきである。UV 硬化の実用面で重要なのは硬化速度であり、積算光量 (J/cm^2) が近似的ではあるが硬化速度との良い相関を示す。UV 強度と照射時間が分かれば積算光量が決まる。照射時間は UV 照射器と硬化材料との相対速度から決まる。最終的には用途に応じた条件下での硬化試験が不可欠である。

ところで UV 強度が上がれば積算光量も容易に高められるので、これまで LED の強度向上に着目されてきた。UV インクの硬化検討において、出力パワーを上げてゆくと、4~6 W/cm^2 あたりを境に硬化速度が必ずしも向上しないことが、最近分かってきた。表面硬化が速く進み過ぎるため内部への UV エネルギーの到達を阻害し、内部硬化が遅くなるためと考えられている。

さて、UV 硬化材料は過去 60 年にわたり UV ランプの広いスペクトルに最適な硬化材料として開発されてきた。LED はランプに比べてピーク強度は大きいがスペクトルは狭いといった特性を持っているので、UV-LED は UV ランプと同列に比較や議論はできない。現在は、UV-LED 硬化技術の普及期であることから、従来の UV 硬化材料を UV-LED で硬化させたいと言う要求が有るものの、安価で、取扱が容易で、長波長で硬化可能な UV-LED 硬化用材料が登場するまでの過渡期と言えよう。

4. UV-LED の劣化機構

UV-LED は、チップを構成する半導体結晶の発光領域に結晶格子の欠陥(転位)ができて、それが成長して電子-正孔対の非発光再結合中心として振る舞う結果、発光効率が低下して出力が低下する。劣化の根本原因である結晶欠陥は、基板結晶内に元からあるもの、およびその上に形成する結晶層の成長工程中に取り込まれる不純物により、どうしても避けられない。チップ内に残った欠陥は、温度、応力、電流密度、光密度などが原因となり増殖し伸びてゆき、それがpn接合付近の発光領域に入り込むと、効率低下の原因である非発光再結合中心ができる。LED の光密度は、比較的小さいので劣化の原因として除外できる。問題となるのは温度、応力および電流密度である。

結晶欠陥が少なく、マイクロクラックを極力除去した応力に強い LED チップの製造などは、LED メーカーの改善に依存する。LED の使用者の立場でチップ内に残存した欠陥の増殖・延伸を防ぐには、チップ実装工程における応力の最適化、LED を動作させる電流密度の制御、LED 温度上昇を抑える冷却が不可欠になる。

5. UV-LED 硬化システムの現状

ここでは、ライン硬化 UV-LED システムについて述べる。UV-LED 硬化システムは、

1) UV-LED アレイ、2) 冷却装置、3) LED 駆動電源、からなる。

UV-LED アレイ

硬化速度を向上させるには、大面積に均一で高い照度を与えることが理想的であるが、UV-LED は依然高価な部品なので、用途に応じて必要最小限の LED を使えるような柔軟な設計も重要になる。

LED アレイの例を図5に示す。複数の UV-LED にレンズおよびヒートシンクを一体化したものを Integration Technology 社では「LED モジュール」と呼び(模式図を図6に示す)、これをアレイ化して照射器を構成している。図5の(a)は、UV-LED モジュール、(b)はこのモジュールをアレイ化した照射器、(c)は1枚の基板に必要な数量の LED を実装した照射器である。

LED モジュールのアレイ化は、基本照射性能はそのままに、所望の長さのアレイを柔軟に作製できる利点があり、アレイ長 2800mm まで対応可能である。この Integration Technology 社の特許技術は、アレイ長が長い場合のコスト優位性が際立つ。なお、UV-LED モジュールの外販も可能である。

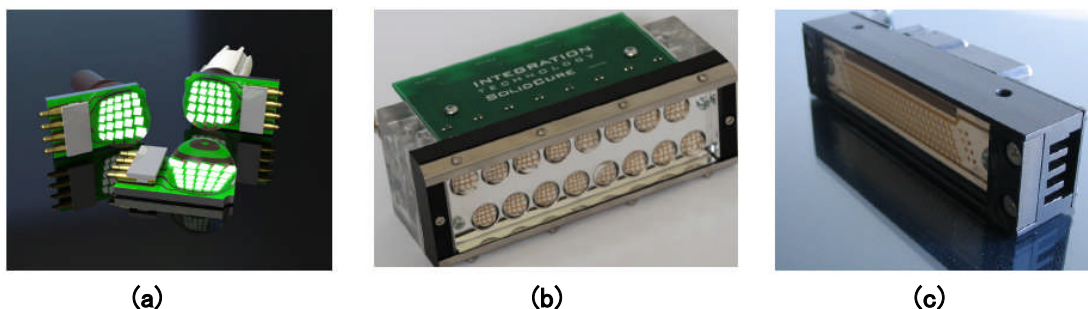


図5 UV-LED アレイ

- (a) プラグイン式 LED モジュール(Integration Technology 社製)
- (b) プラグイン LED モジュール16個で構成されたアレイ(Integration Technology 社製)
- (c) 1枚の基板に LED を100個実装したアレイ

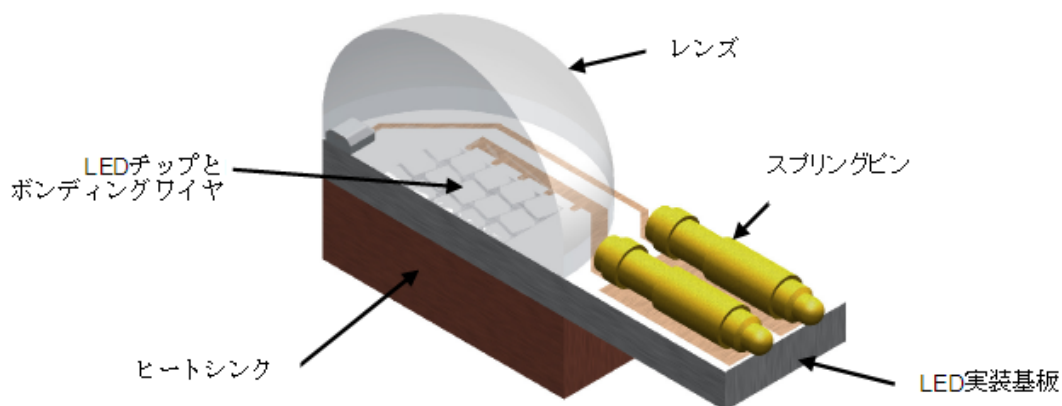


図6 Integration Technology 社製 UV-LED モジュールの模式図

冷却装置

UV-LED の冷却には、強制空冷と水冷の2つの手法が一般的である。空冷で対応できるのはピーク強度 $4\text{W}/\text{cm}^2$ 程度が上限となり、それ以上は水冷が必要になる。

空冷方式は、強制空冷を行うために照射器内にファンを内蔵すれば良く、照射器を小型軽量にでき、硬化システム全体を低コストに構成可能な利点がある。なお防塵を要求するクリーンルーム内での使用など、水冷を要求する用途もある。

水冷方式では、冷却水を冷やす循環式冷却装置と冷却水配管が必要になる。循環式冷却装置にはラジエター型とチラー型がある。ラジエター型は安価で小型であるが、熱交換効率が低く、周囲温度の影響を受ける(通常40°C以下)。特に熱源であるLEDを多く用いる場合、ラジエター型では限界がある。一方チラー型は高価で装置が大きくなるが、LED使用数への制限はない。

水冷方式では、少なくとも冷却水の流量と温度を常時監視し、規定値から外れた時にLEDへの電源供給を遮断するインターロックを備え、LEDの劣化や破壊、照射器の異常発熱を防ぐべきである。

LED 駆動電源

UV-LED 硬化において、出力強度を制御するよりも積算光量を制御する方が理にかなっている。そこでLED出力強度を一定にしてパルス駆動し、パルスのデューティー比を変化させるPWM(Pulse Width Modulation)駆動を行う(図7参照)。デューティー比が75%ならばLEDの発光時間が75%になり、積算光量は75%となる。PWM制御は電流値制御を行うよりも電力損失が少なく、特にUV-LEDアレイのように大電流の制御の際は高効率な制御を行える点に利点がある。LEDの劣化の進行はLEDの電流密度と温度に影響を受けるが、LEDの冷却を適切に行えば、PWM駆動はLED劣化抑制にも寄与する。Integration Technology社の製品では、PWM制御基板をLED照射器内あるいは電源内部のどちらにも設置可能である。

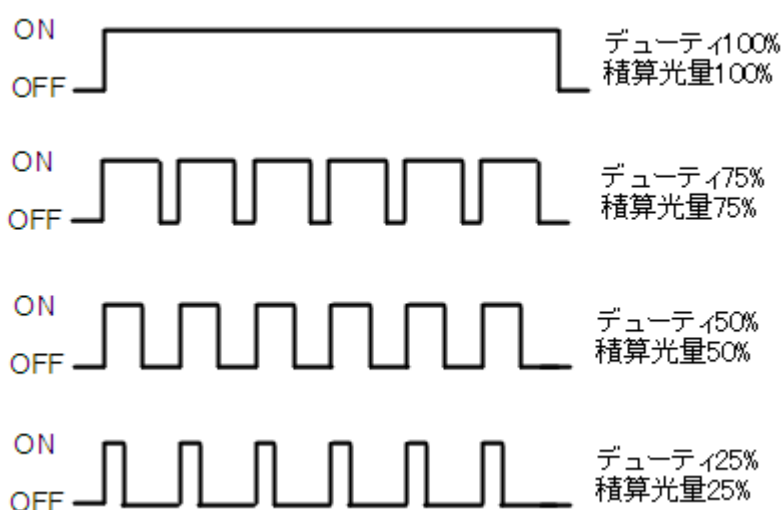


図7 PWM 駆動

6. UV-LED 硬化装置の最新動向

Integration Technology 社は、従来の水冷方式 SolidCure および空冷方式 PinCure の2機種に加えて、2010年9月10日に新たに10機種の最新のUV-LED硬化システムを発表した⁶⁾。

1) 水冷システム：SolidCure シリーズ

25個のLEDを実装した「プラグインLEDモジュール」(図5(a)、図6)を水冷ジャケットに挿入して照射器を構成する点が最大の特長である。水冷ジャケットには、密度 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ の亚克力材や密度 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ のアルミ材を用いるので、極めて軽量かつ小型になる。図5(b)は、「SolidCure」の照射器のコア部分を示しており、これにカバーを取付けて使用する。

SolidCureはLEDモジュールを2列に配して照射面積を大きくしている。但し1列でも十分な積算光量が得られる場合には、高価なLED数量を半減させコストを抑えた「SolidCure N」を選択できる。なお、いずれも最大強度は $4\text{W}/\text{cm}^2$ (395nm、1mmの距離)を達成している。

アレイ幅は、2列モジュールで32mm、1列モジュールで16mm。アレイ長は、80mmから最大2800mmまで7mm刻みで拡張可能で、必要最低限のLED数量で照射器を構成できる点も、大きな特長である。拡張した場合でも強度分布は $\pm 5\%$ 以内である。LEDの波長も選択でき、365nm、385nm、395nm、405nmの4種類の異なる発光波長に対応している。

さて、電源を改良して、最大強度を $8\text{W}/\text{cm}^2$ (395nm、1mmの距離)に増強した「SolidCure Plus」および「SolidCure N Plus」は2010年12月発売予定である。SolidCureシリーズの照射器例を図8に示す。アレイ長400mmのSolidCureがUVラミネータ(UVニス加工)に採用された事例を図9に示す。

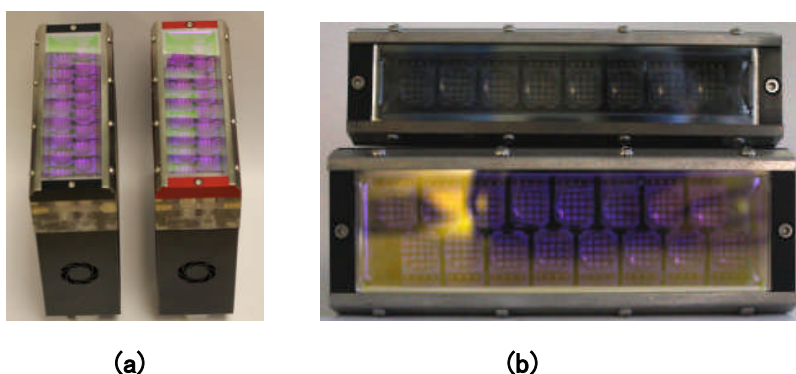


図8 SolidCure シリーズの照射器

(a) 左：SolidCure、右：SolidCure Plus

(b) 上：SolidCure N、下：SolidCure



図9 UV ラミネータへの SolidCure 適用例 (LED アレイ長 400mm)

2) 空冷システム

照射器内蔵の強制空冷用ファンが冷却装置であるので、空冷 UV-LED 照射器は非常に小型にできる。

PinCure シリーズ

Integration Technology 社の最小・最軽量の製品が「PinCure」で、幅 20mm × 長さ 80mm × 高さ 90mm、重量 125g である(図10参照)。最大強度 0.5W/cm²である。

「PinCure」は図10に示すアレイ長 80mm の筐体を基本単位として、これを繋げて最大アレイ長 2800mm まで拡張可能。但し拡張した場合でも強度分布は±5%以内である。電源改良により最大強度 1W/cm²の「PinCure+」も選択できる。

VTwin シリーズ

「PinCure」は1列の LED アレイであるが、これを2列にしたのが VTwin シリーズである。アレイ幅が 32mm である以外は、基本構造や拡張性は「PinCure」と同じであり、最大強度 0.75 W/cm²である。PWM 電源を改良した「VTwin+」は、最大 1.5W/cm²を得る(図11)。VTwin シリーズは、PinCure シリーズの強度の倍にはならないが、積算光量は倍近くになっている。

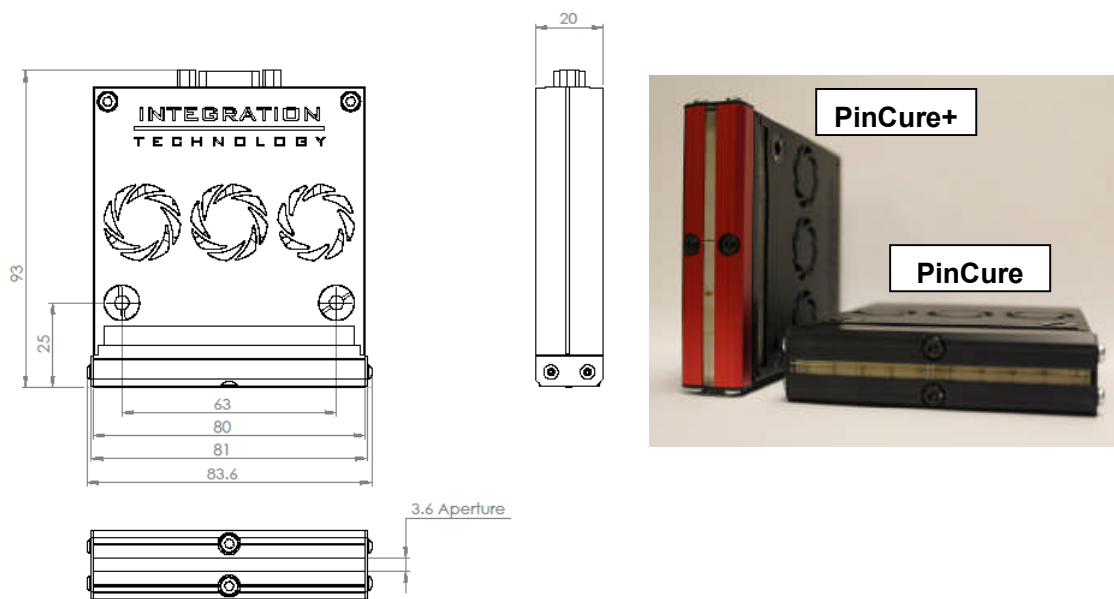


図10 PinCure シリーズ照射器(空冷、小型軽量)

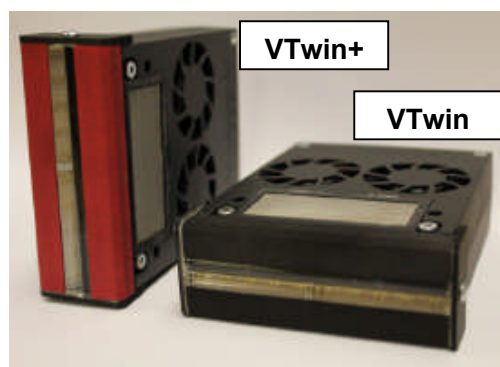


図11 VTwin シリーズ

Hi-Cure シリーズ

空冷システムの高出力化を求める市場要求に答えるために、Integration Technology は Hi-Cure シリーズ(図12)を開発し、2011年3月に発売を開始した。

主な特長は、

- ・最大強度: $4\text{W}/\text{cm}^2$
- ・LED モジュール構造: SolidCure よりも大面積の発光面。
- ・LED モジュール・アレイ: 2列アレイと1列アレイの2機種を投入
- ・アレイ幅: 75mm(2列アレイ)と 32mm(1列アレイ)
- ・アレイ長: 35mm から 2800mm まで対応

詳細は弊社ホームページ⁶⁾をご覧ください。弊社までご相談ください。



(a)



(b)



(c)

図12 Hi-Cure シリーズ照射器

(a) と (b): 2列アレイ、

(c) : 1列アレイ

7. おわりに

LED の特性、その特有の劣化機構を整理し、それらに基づき設計開発された水冷および空冷両方の UV-LED 硬化システム、およびその最新動向を紹介した。UV-LED 技術や硬化材料技術の根本は 2000 年には出揃い、それらは共に実用化に向けて力が注がれている新しい技術である。本稿では LED 硬化装置の側面からまとめたが、硬化装置と硬化材料は両輪となって進展してゆくものであり、最適な UV-LED 硬化を実施するには、それぞれの最適な選定が必要である。カタログデータである UV-LED の強度至上主義に陥ることなく、用途に応じた最適な積算光量を、実際の硬化試験により見極めることが重要であり、弊社では硬化試験用装置の貸し出しを行っているので、利用して頂きたい。今回紹介しきれなかった有用な硬化試験データは、別の機会に紹介してゆきたい。本稿で紹介した全ての製品資料は、弊社ホームページ⁶⁾からダウンロード可能である。詳細はお問い合わせください。

最後に、本稿をまとめるにあたって、開発技術情報を提供して頂いた Integration Technology 社に感謝致します。Integration Technology 社は、UV インクジェット硬化装置の有力メーカーで、世界市場で推定 60%のシェアを持っています。産業用途向けにも完成度の高い UV-LED 硬化装置を供給しています。

※ 参考文献

- 1) 松永元太郎、乾秀夫: 感光性高分子, 講談社 (1977)
- 2) 米沢輝彦: PS版概論, 印刷学会出版部 (1994)
- 3) 山岡亜夫、松永元太郎: フォトポリマーテクノロジー, 日刊工業発行 (1988)
- 4) 米津宏雄: 光通信素子工学, 工学図書 (1992)
- 5) Jacques I. Pankove: Optical Processes In Semiconductors, Dover Publications (2010)
- 6) ファインセンシング(株)ホームページ: UV-LED 硬化システム「ハイパワーLED-UV 硬化システム」, <http://www.finesensing.com/Integ/LEDCuring.htm>

以 上

本稿は、雑誌「コンバーテック」の 2010 年 6 月号に掲載した内容です。

※) 刈田 保樹: UV硬化システムの最新動向、コンバーテック、38(11)、98-103 (2010)

【お問合せ先】

ファインセンシング株式会社

〒273-0025 千葉県船橋市印内町 568-1-3

Tel: 047-495-9120 Fax: 047-495-9121

E-mail: inquiry@finesensing.com