

УДК 681.586.36: 621.762.06

## ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХЦВЕТОВОЙ ПИРОМЕТРИИ В ПРОЦЕССАХ 3D-ПЕЧАТИ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Бельская А.П.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Солодухин И.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики  
Кузнецик О.О. – зав. группой участка 3D-печати Института  
порошковой металлургии имени академика О.В.Романа

**Аннотация.** В статье, исходя из анализа формулы Планка, определяющей спектральную энергетическую яркость абсолютно чёрного тела, и возможности её упрощения с учётом приближения Вина при проведении расчётов яркостной и цветовой температуры, изложена принципиальная возможность регистрации этого показателя в процессе 3D-печати методом селективного лазерного сплавления (СЛС) с помощью двухцветовой пирометрии. Вместе с этим, представлены оптические схемы калибровки по эталонному источнику и регистрации температуры на платформе 3D-печати методом СЛС, которые могут быть реализованы с помощью двухцветовой пирометрии, а также изложена возможность создания на основе этого не только двухцветового пирометра, но и программно-виртуального тепловизора, если использовать диалоговый вычислительный комплекс, который может быть создан на базе персонального компьютера.

**Ключевые слова.** Аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление (СЛС), пирометр, фотодиод, яркостная, цветовая и истинная температура, двухцветовая пирометрия.

**Введение.** Появившееся в первом десятилетии текущего века аддитивное производство (АП) в настоящее время является одним из наиболее перспективных и быстроразвивающихся направлений промышленности [1–3], в котором особую роль занимают аддитивные технологии (АТ) трёхмерной цифровой (3D) печати, использующие металлургические методы послойного селективного лазерного сплавления (СЛС) порошкового слоя, состоящего из сферических частиц металлических сплавов. Для реализации АТ на АП в качестве технологического оборудования используются металлургические 3D-принтеры [1–3], в конструкции которых, как правило, применяются волоконные лазеры мощностью 500–1000 Вт, которые имеют длину волны импульсного одномодового излучения  $\lambda=1070\text{--}1080$  нм и частоту следования импульсов 10–50 кГц. Контроль температуры в зоне лазерного сплавления частиц порошка при 3D-печати является важным технологическим параметром, определяющим качество получаемых материалов и изделий. Существующие промышленные образцы пирометров, измеряющие, в основном, яркостную температуру за временной промежуток порядка  $10^{-3}$  с, не позволяют в полной мере решить эту задачу. Поэтому совершенствование способов контроля температуры в зоне 3D-печати, осуществляемой методом СЛС, является актуальной задачей для АП. Её решение может быть основано на применении двухцветовой пирометрии [4–7]. Целью данной работы является изложить принципиальную возможность использования такого способа измерения температуры в зоне 3D-печати методом СЛС с представлением оптических схем калибровки по эталонному источнику и регистрации температуры на платформе 3D-печати методом СЛС, а также показать возможность создания тепловизора на основе элементарной фотодиодной ячейки, входящей в конструкцию двухцветового пирометра.

**Двухцветовая пирометрия как способ измерения температуры процесса СЛС.** Известно [4–7], что яркостная температура ( $T_b$ ) абсолютно черного тела (АЧТ) зависит от спектральной энергетической яркости ( $L_\lambda$ ), определяемой формулой Планка :

$$L_\lambda^0 = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (1)$$

в которой  $C_1 = 2 \cdot h_P \cdot c^2 \approx 1,19 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup>;  $C_2 = h_P \cdot c \cdot (k_B)^{-1} \approx 1,44 \cdot 10^{-2}$  м·К, где «0» (нулевой индекс) означает отношение к АЧТ;  $h_P$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света;  $\lambda$  – длина волны теплового излучения;  $T$  – температура теплового излучения.

Из формулы (1) следует:

$$T_b = \frac{C_2}{\lambda} \cdot \left[ \ln\left(1 + \frac{C_1}{L_\lambda^0 \cdot \lambda^5}\right) \right]^{-1} = \frac{C_2}{\lambda} \cdot \left[ \ln\left(\frac{I_\lambda^0}{I_\lambda^0 + 1}\right) \right], \quad I_\lambda^0 = \frac{L_\lambda^0 \cdot \lambda^5}{C_1}, \quad (2)$$

где  $I_\lambda$  – монохроматическая интенсивность теплового излучения.

Как сообщается в работах [6–8], если выполняется условие  $C_2 \gg \lambda \cdot T$ , то формулы (1) и (2) примут упрощённый вид в приближении Вина:

$$L_\lambda^0 \approx \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right), \quad T_b \approx \frac{L_\lambda^0 \cdot \lambda^4}{2 \cdot k_B \cdot c} = \frac{C_1 \cdot I_\lambda^0}{2 \cdot \lambda \cdot k_B \cdot c}. \quad (3)$$

Следует отметить [1–3], что у используемых в настоящее время для 3D-печати методом СЛС порошков металлических сплавов температуры плавления не превышают 2000 К, а температуры кипения – 4000 К. Учитывая формулу Планка и закон смещения Вина, длины волн характерного для сплавления металлических частиц теплового излучения будут лежать в более коротком диапазоне (560–780 нм), чем лазерное излучение. Но даже и в этом случае, для оценки значений таких показателей, как  $T_b$ ,  $L_\lambda$ ,  $I_\lambda$  можно использовать упрощённые формулы (1) и (2) в приближении Вина.

Несмотря на то, что в АТ, использующих 3D-печать методом СЛС, используется защитная атмосфера, препятствующая окислению порошков металлических сплавов, тем не менее, реальное тепловое излучение, непосредственно связанное с процессом плавления частиц, будет иметь определённую степень черноты  $\varepsilon_\lambda \leq 1$ , которую следует учитывать в формулах (2) и (3):

$$L_\lambda \approx \frac{C_1 \cdot \varepsilon_\lambda}{\lambda^5} \cdot \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right), \quad T_b \approx \frac{L_\lambda \cdot \lambda^4}{2 \cdot k_B \cdot c} = \frac{C_1 \cdot I_\lambda}{2 \cdot \lambda \cdot k_B \cdot c}, \quad I_\lambda = \frac{L_\lambda \cdot \lambda^5}{C_1} = \varepsilon_\lambda \cdot \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right). \quad (4)$$

Согласно формуле Планка (1), цветовая температура определяется как температура АЧТ, при которой оно испускает излучение того же цветового тона, что и рассматриваемое излучение [6–8]. Если это принять во внимание, то характерное для сплавления металлических частиц тепловое излучение в процессе СЛС будет представлять собой быструю ( $\sim 10^{-5}$ – $10^{-3}$  с) смену переходящих друг в друга цветовых тонов от красного (780 нм) к жёлтому (570 нм) и обратно. Однако внешне это процесс будет выглядеть, как бегающий по поверхности сформованного на платформе 3D-печати порошкового слоя ярко-белый локализованный в точечное пятно диаметром 0,1–0,2 мм факел теплового излучения. Использование фотодиода в качестве фотоприёмника такого излучения для измерения яркостной температуры представляет непростую задачу, хотя бы потому, что у большинства кремниевых фотодиодов спектральная чувствительность лежит в диапазоне  $\Delta\lambda=400$ – $1100$  нм, а максимальная спектральная характеристика – в диапазоне  $\Delta\lambda=800$ – $900$  нм. Кроме этого, содержащий информацию о температуре дифференцированный сигнал ( $S_\lambda$ , мА) с выхода фотодиода будет зависеть не только от интенсивности ( $I_\lambda$ ) теплового излучения образующегося факела в зоне СЛС, но и от геометрических возможностей оптической системы пирометра (ОСП), которые определяют размеры геометрической проекции ( $G$ ) определённой части потока этого излучения на фоточувствительную площадку фотодиода, которая имеет малые размеры. Всё это будет вносить дополнительную погрешность в измерение яркостной температуры по показателям  $S_\lambda = S_\lambda(G, \varepsilon_\lambda, I_\lambda)$ .

Как следует из анализа работ [6–8], снижению этой погрешности может способствовать использование в составе ОСП объектива, соединённого своим выходом с волоконно-оптической линией, подключенной к оптическому разветвителю, который из поступающего формирует два равнозначных движущихся параллельно друг другу световых потока, один из которых пересекает оранжевый оптический фильтр  $\lambda_1 = 600$  нм с пропускной способностью  $\Delta\lambda_1$ , а другой – красный оптический фильтр  $\lambda_2 = 750$  нм с пропускной способностью  $\Delta\lambda_2$ . Выбранные оптические фильтры позволяют снизить до логического минимума влияние отражённого одномодового лазерного излучения на длине волны  $\lambda=1070$ – $1080$  нм на формируемый им при сплавлении частиц порошков металлических сплавов тепловой поток.

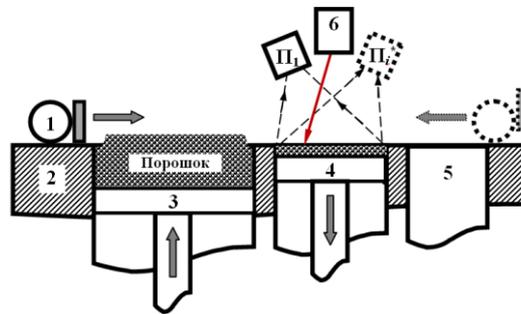
Если сравнить полученные после пересечения этих оптических фильтров спектральные соотношения полученных световых потоков, то, как показано в работах [5–7], можно получить формулу для расчёта цветовой температуры  $T_c$ , в которой погрешность будет снижена за счёт сокращения, связанного с делением  $S_{\lambda_1} / S_{\lambda_2}$ , таких показателей, как  $G_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$ :

$$T_c = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot C_2 \cdot \left[ (\lambda_2 - \lambda_1) \cdot \ln \left( \frac{I_{\lambda_2}}{I_{\lambda_1}} \cdot \left[ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right]^5 \right) \right]^{-1} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot C_2 \cdot \left[ (\lambda_2 - \lambda_1) \cdot \ln \left( \frac{S_{\lambda_1}}{S_{\lambda_2}} \cdot \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta\lambda_1} \cdot \left[ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right]^6 \right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

где  $T_c$  – цветовая температура;  $\Delta\lambda_1$ ,  $\Delta\lambda_2$  – полоса пропускания оптических фильтров.

Вышеописанная оптическая система может быть использована в двухцветовом пирометре, в котором имеется фотодиодная пара. Тогда на выходе одного из этих фотодиодов, перед которым находился оптический фильтр  $\lambda_1$ , имеющий границу  $\Delta\lambda_1$ , будет формироваться дифференцированный сигнал  $S_{\lambda_1}$ , а у другого, перед которым находился оптический фильтр  $\lambda_2$ , имеющий границу  $\Delta\lambda_2$ , – сигнал  $S_{\lambda_2}$ . На рис. 1 приведена схема использования такого пирометра для

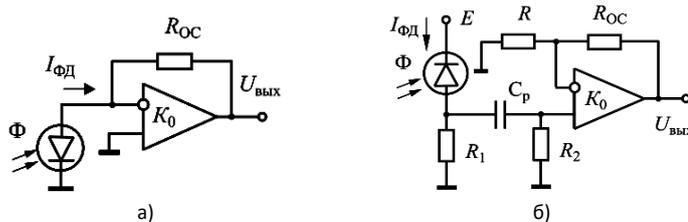
регистрации температуры в процессе 3D-печати методом СЛС. С её помощью может быть реализован следующий алгоритм регистрации температуры на платформе 3D-печати в процессе СЛС. Сначала платформа подачи порошка 3 выдвигает порошковый слой на определённую высоту. Затем каретка 1 опускает скребок и сдвигает относительно стола 2 этот слой на платформу 3D-печати 4, сбрасывая при своём движении остатки порошка в приёмник 5. После этого каретка 1 поднимает скребок и откатывается в исходное состояние, доуплотняя порошок при своём движении. После пересечения платформы 3D-печати при возвращении в исходное положение включается лазер, и зеркала головки сканатора по программе начинают с помощью F-Theta линзы перемещать фокальное пятно импульсного лазерного излучения по платформе 3D-печати, а перемещающийся вместе с пятном факел теплового излучения регистрируется фотодиодными ячейками двухцветового пирометра. Если интенсивность проецируемой части потока теплового излучения, образующегося в фокальном пятне при СЛС, мала и по этой причине у одного пирометра не хватает чувствительности, чтобы зарегистрировать температуру, то повысить чувствительность пирометра можно за счёт размещения над платформой 3D-печати в разных точках либо дополнительной (или дополнительных) ОСП, оптические выходы которой входят в оптический сплиттер (или сумматор), либо за счёт подключения в систему измерения дополнительного (или дополнительных) пирометров ( $\Pi_i^*$ ).



1 – каретка со скребком; 2 – стол; 3 – платформа подачи; 4 – платформа 3D-печати; 5 – приёмник остатка порошка;  
6 – головка оптического сканатора для программного перемещения лазерного излучения;  $\Pi_1$  – пирометр;  
 $\Pi_1^*$  – дополнительная ОСП или дополнительный пирометр

Рисунок 1 – Оптическая схема регистрации температуры на платформе 3D-печати методом СЛС

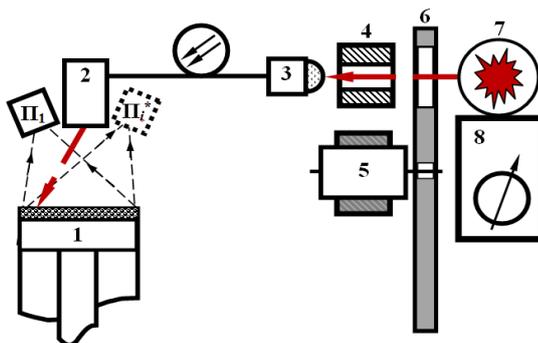
**Калибровка двухцветового пирометра.** На рис. 2 приведены типовые схемы включения фотодиодов [8, 9], которые могут быть использованы в конструкции двухцветового пирометра для формирования дифференцированных сигналов ( $S_A$ , мА), по которым, после получения с помощью АЦП кодовых комбинаций и численных методов вычисления в режиме реального времени, могут быть получены значения  $T_c$  с помощью формулы (5).



а) вольт-амперная чувствительность по энергетическому потоку; б) токовая чувствительность по световому потоку

Рисунок 2 – Типовые блок-схемы включения фотодиодов в усилительно-измерительный тракт

Для обеспечения точности полученных значений  $T_c$ , достижимой для используемого пирометра, необходимо проводить его калибровку (рис. 3) по эталонному источнику (ЭИ) 7, в качестве которого, например, могут использоваться лампы СИ 6-40, СИ6-100 или СИ8-200у. Если использовать эти лампы в качестве ЭИ 7, то необходимо учитывать, что они генерируют только непрерывный поток теплового излучения. Чтобы минимизировать погрешность измерения температуры в фокальном пятне при 3D-печати методом СЛС, то калибровку (рис. 3) рекомендуется проводить в технологической камере металлургического 3D-принтера с использованием растровой оптической поверхности, расположенной на платформе 3D-печати 1, вместо порошкового слоя. Растры на такой поверхности должны быть выполнены в виде непрозрачной сетки с квадратными узловыми ячейками. При этом размер ( $\alpha$ , мкм) каждой из сторон такой ячейки должен быть сопоставим с квадратным корнем диаметра ( $D$ , мкм), т. е.  $\alpha \approx D^{1/2}$ , а сами ячейки должны обладать свойствами зеркально отражающей поверхности. Толщина растров должна быть таковой, чтобы не было отражений от соседних узловых ячеек. Рекомендованное количество узловых ячеек на оптической подложке должно быть не менее 100, а их расположение на платформе 3D-печати должно быть равномерным по всей площади.



1 – платформа 3D-печати с растровой зеркальной поверхностью; 2 – головка сканатора; 3 – объектив с оптической волоконной линией; 4 – коллиматор; 5 – электродвигатель; 6 – растровый диск; 7 – эталонный источник; 8 – источник электропитания прецизионный

Рисунок 3 – Оптическая схемы калибровки пирометра по эталонному источнику теплового излучения

Учитывая, что частота импульсов лазерного излучения в процессах СЛС может достигать 50 кГц, для преобразования непрерывно генерируемого ЭИ 7 потока теплового излучения в мерцающий требуемой частоты, перед ЭИ необходимо устанавливать оптически прозрачный диск 6 (рис. 3) с нанесёнными непрозрачными растрами, который закреплён на валу электродвигателя 5. Если такой электродвигатель обеспечивает гарантированную угловую скорость вращения 3000 об./мин., а вращаемый этим двигателем 5 диск 6 имеет тысячу растров, то за этим диском генерируемый ЭИ 7 поток теплового излучения будет мерцать с частотой 50 кГц. Для придания мерцающему потоку круглого сечения, его необходимо направлять через коллиматор 4, а для того, чтобы он попал на диодную пару двухцветового пирометра  $\Pi_1$ , а также на подключенные к нему дополнительные ОСП или на работающий с ним в паре другой пирометр  $\Pi_2^*$  (рис. 3), то мерцающий поток после коллиматора 4 необходимо направить через объектив 3 и связанную с ним оптическую волоконную линию на вход головки сканатора. Далее, управляя головкой сканатора, необходимо откалибровать пирометр по узловым ячейкам растровой поверхности, находящейся на платформе 3D-печати 1.

Если использовать при калибровке по ЭИ (рис. 1) и при регистрации температуры (рис. 3) на платформе 3D-печати методом СЛС не только одну ОСП и один пирометр, а несколько, то можно получить, как минимум два измерительных канала, которые могут быть подключены к входам аналого-цифровых преобразователей (АЦП), позволяющих получать кодовые комбинации для численной обработки в диалоговом вычислительном комплексе (ДВК), который может быть реализован даже на базе персонального компьютера. Если кроме этого, в состав ДВК также включено программное обеспечение, дополненное программой или программным пакетом, позволяющим осуществить привязку регистрируемой с помощью фотодиодной пары температуры с координатным положением перемещающегося по платформе 3D-печати фокального пятна лазерного излучения, то кроме двухцветового пирометра, на основе этого также может быть также получен и программно-виртуальный тепловизор. Такое преобразование ДВК возможно, если он содержит диалоговую программу, позволяющую графически отображать на экране компьютерного монитора поверхность расположенного на платформе 3D-печати порошкового слоя с точно-пиксельным координатным наложением на отображение этого слоя регистрируемой температуры в зоне программно перемещающегося фокального пятна лазерного излучения. При этом такая температура на экране компьютера должна быть представлена в точно-пиксельной отрисовке, цвет и тон которой соответствует цвету и тону монохроматической длины волн регистрируемой температуры, определяемый согласно принятому стандарту [10]. Длительность существования такой точно-пиксельной отрисовки с плавным изменением её тона и цвета может также определяться программно, исходя из рассчитанных числовыми методами скорости охлаждения зоны сплавленных в фокальном пятне частиц порошка металлического сплава при 3D-печати методом СЛС.

### Заключение (выводы)

1. Исходя из анализа формулы Планка, определяющей спектральную энергетическую яркость абсолютно черного тела, и возможности её упрощения с учётом приближения Вина при расчётах яркостной и цветовой температуры, изложена принципиальная возможность регистрации этого показателя в процессе 3D-печати методом СЛС с помощью двухцветовой пирометрии.

2. Представлены оптические схемы калибровки по эталонному источнику и регистрации температуры на платформе 3D-печати методом СЛС, которые могут быть реализованы с помощью двухцветовой пирометрии, а также изложена возможность создания на основе этого не только двухцветового пирометра, но и программно-виртуального тепловизора, если использовать ДВК, который может быть создан на базе персонального компьютера.

3. Указаны как преимущества двухцветового пирометра, позволяющие повышать точность измерения температуры, так и необходимые требования к ДВК, на базе которого может быть создан такой пирометр или программно-виртуальный тепловизор.

4. К числу указанных в части обеспечения аппаратными средствами требований к ДВК, кроме наличия в его составе персонального компьютера (или аналогичного ему любого другого, например, смартфона), также относятся и те, которые рекомендуют включить АЦП, соединённый с его входом усилительно-измерительный тракт (рис. 2) из фотодиодной пары, на фоточувствительные элементы которой поступает проекция распараллеленного потока теплового излучения из фокального пятна лазерного излучения.

5. К числу указанных в части обеспечения программными средствами требований к ДВК относятся те, которые рекомендуют дополнить основное программное обеспечение самостоятельно разработанным специализированным программным пакетом, позволяющий осуществить, как числовой преобразование получаемых с АЦП электрических сигналов, которые поступают от каждого отдельного фотодиода, так и использовать эти числовые преобразования для вычисления, запоминания, хранения и визуального отображения регистрируемых значений температуры в зоне 3D-печати методом СЛС. Для обеспечения возможности использования такого ДВК не только в качестве двухцветового пирометра, но и программно-виртуального тепловизора, необходимо разработать специализированный программно-графический пакет, позволяющий отображать на экране компьютерного монитора поверхность расположенного на платформе 3D-печати порошкового слоя с точно-пиксельным координатным наложением на отображение этого слоя регистрируемой температуры в зоне программно перемещающегося фокального пятна лазерного излучения.

#### **Список использованных источников**

1. Введение в аддитивные технологии. Обзор основных технологий 3D-печати: учебник / М.В. Канищев, Л.М. Ульев. – М.: «МИСиС», 2023. – Т.1. – 352 с.
2. Гибсон Я. Технологии аддитивного производства / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер. – М.: Техносфера, 2016. – 656 с.
3. Рудской А.И. Аддитивные технологии: учеб. пособие / А.И. Рудской [и др.] – СПб: С.-Петербург. политехн. ун-т Петра Великого, 2017. – 251 с.
4. Измерение температур в технике: Справочник / Ф. Линеверг; Пер. с нем. Т. И. Киселевой, В. А. Федоровича. – М.: Металлургия, 1980. – 543 с.
5. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. – М.: Наука, 1982. – 340 с.
6. Снопко В.Н. Основы методов пирометрии по спектру теплового излучения. – Минск: Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, 1999. – 224 с.
7. Марукович Е.И. Моделирование двухцветного пирометра со световодным трактом для металлургических печей / Е.И. Марукович [и др.] // Литьё и металлургия, 2010. – № 3 (56). – С. 48–58.
8. Алейник А.С. Основы схемотехники приемопередающих электронных устройств / А.С. Алейник [и др.] – СПб: Университет ИТМО, 2021. – 149 с.
9. Алексеенко М.Д. Микроэлектронные фотоприёмные устройства / М.Д. Алексеенко [и др.] – М. Энергоатомиздат, 1984, – 208 с.
10. ГОСТ Р 55703-2013 Источники света электрические. Методы измерений спектральных и цветовых характеристик. – М.: Стандартинформ, 2015. – 57 с.

UDC 681.586.36: 621.762.06

## APPLICATION POTENTIAL OF TWO-COLOR PYROMETRY IN 3D PRINTING PROCESSES BY SELECTIVE LASER MELTING METHOD

*Belskaya A.P.*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*

*Minsk, Republic of Belarus*

*Saladukhin I.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Physics;  
Kuznechik O.O. – Head of the 3D Printing Section, Powder Metallurgy Institute.*

**Abstract.** Based on the analysis of Planck's law defining the spectral radiance of a black body and its possible simplification using Wien's approximation for brightness and color temperature calculations, this article demonstrates the fundamental feasibility of temperature monitoring during selective laser melting (SLM) 3D printing through two-color pyrometry. The paper presents optical calibration schemes using reference sources and temperature measurement systems for SLM platforms that can be implemented with two-color pyrometry. Furthermore, it explores the potential of developing not only a two-color pyrometer but also a software-based virtual thermal imaging system utilizing an interactive computational platform that could be implemented on a personal computer.

**Keywords.** Additive manufacturing, selective laser melting (SLM), pyrometer, photodiode, brightness temperature, color temperature, true temperature, two-color pyrometry.