

# HDR制作、转换与播出

北京宇田索诚科技股份有限公司 技术总监

北京电影学院 未来影像高精尖创新中心 特聘研究员

中央广播电视总台技术局质量管理部 顾问

王亚明

2021年7月

# 与HDR制作有关的ITU（国际电信联盟）文件

## □ ITU-R BT.2100-2（07/2018）

■ Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange

（用于制作和国际节目交换的高动态范围电视图像参数值）

■ 对应的中国标准：GY/T 315-2018 高动态范围电视节目制作和交换图像参数值

## □ ITU-R BT.2390-8（02/2020）

■ High dynamic range television for production and international programme exchange

（用于制作和国际节目交换的高动态范围电视）

## □ ITU-R BT.2408-3（07/2019）

■ Guidance for operational practices in HDR television production

（HDR电视制作操作实践指南）

## □ ITU-R BT.2446-0（04/2019）

■ Methods for conversion of high dynamic range content to standard dynamic range content and vice-versa

（将高动态范围内容转换为标准动态范围内容以及反向转换的方法）

伽玛 (Gamma,  $\gamma$ )

# 伽玛

□ 伽玛（Gamma,  $\gamma$ ）是一个在影视行业经常谈论，但很容易被误解的概念

■ 对影视制作来说伽玛就像空气一样无处不在，但常常被忽略

■ 伽玛很简单，但又非常神秘

□ 从技术角度看

■ 在电视行业，狭义的伽玛是伽玛校正的简称，是为校正显像管的非线性特性在信号源端对视频信号电平进行的非线性处理

■ 在影视行业，广义的伽玛表示系统的亮度（或称为灰度）特性，即拍摄、制作和显示系统的光-电、电-电、电-光、光-光转换函数，也就是OETF、EETF、EOTF、OOTF

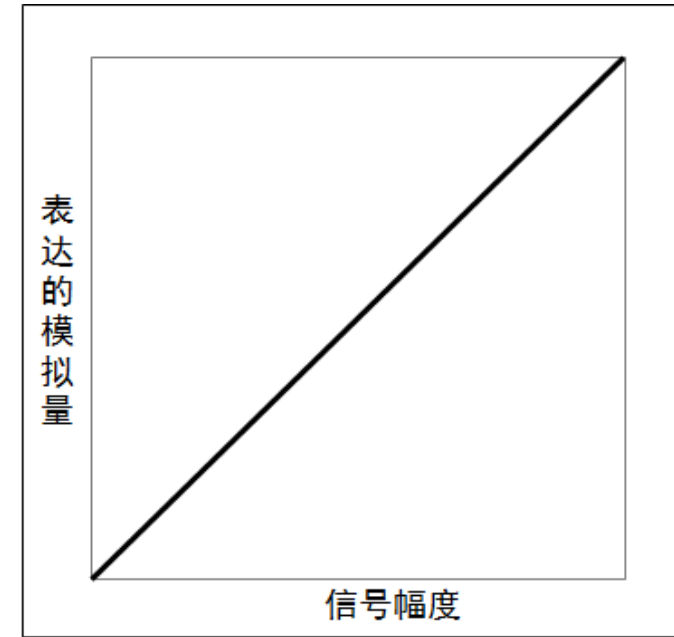
□ 伽玛应用于所有电子影像设备

■ 与分辨率无关，与码率无关

# 线性与非线性

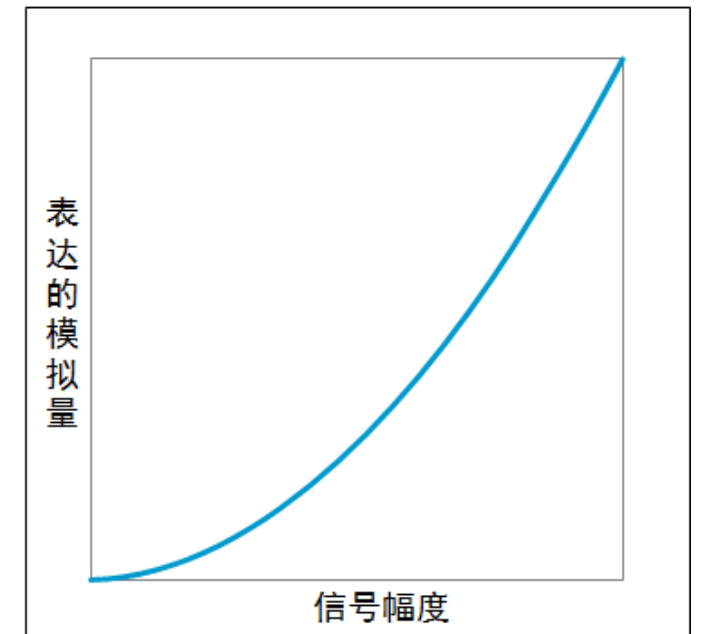
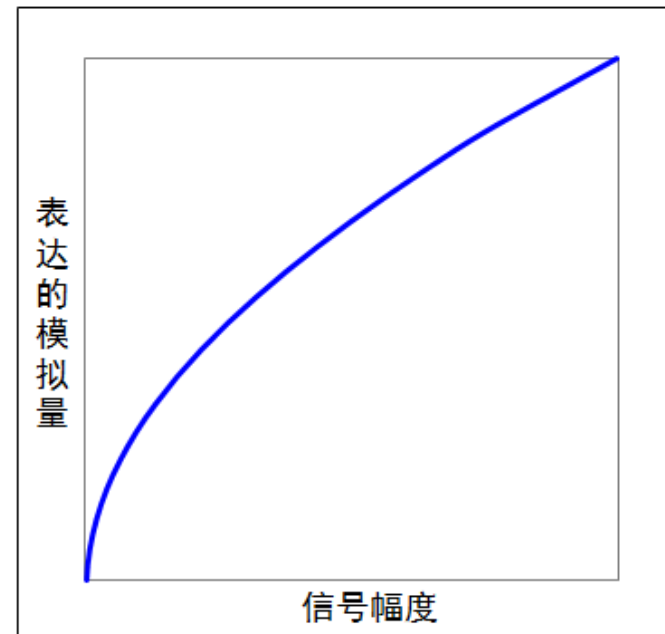
## □ 线性

- 信号幅度与表达的模拟量之间呈现等比例的线性关系，其特性为一条直线，表达函数为线性的一次方程
- 例如，音频信号采用线性表达方式

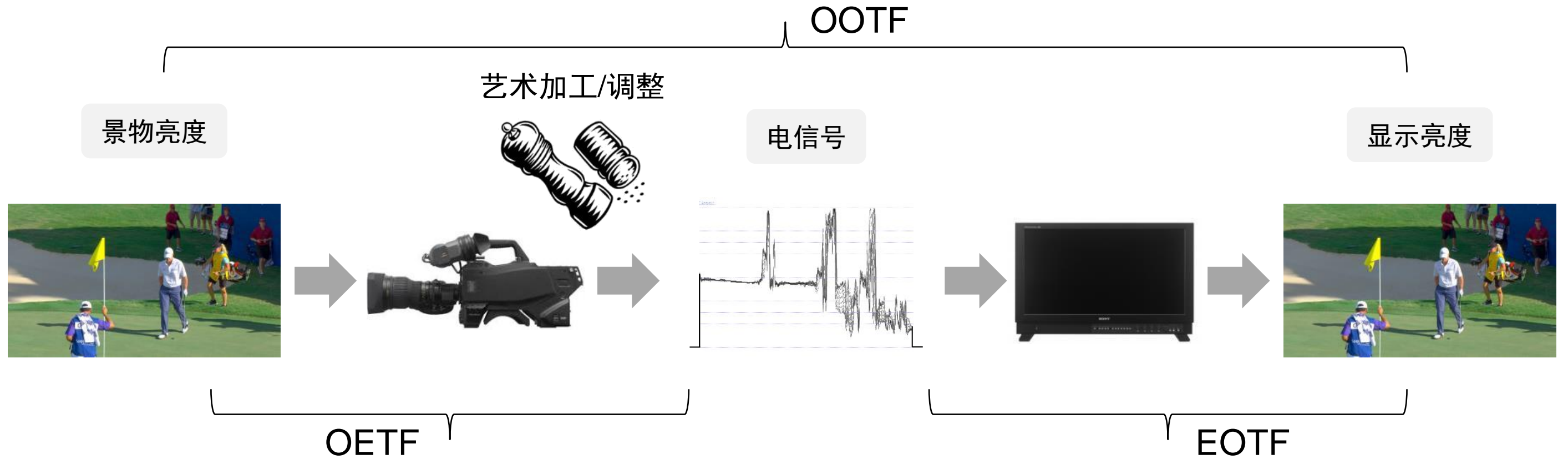


## □ 非线性

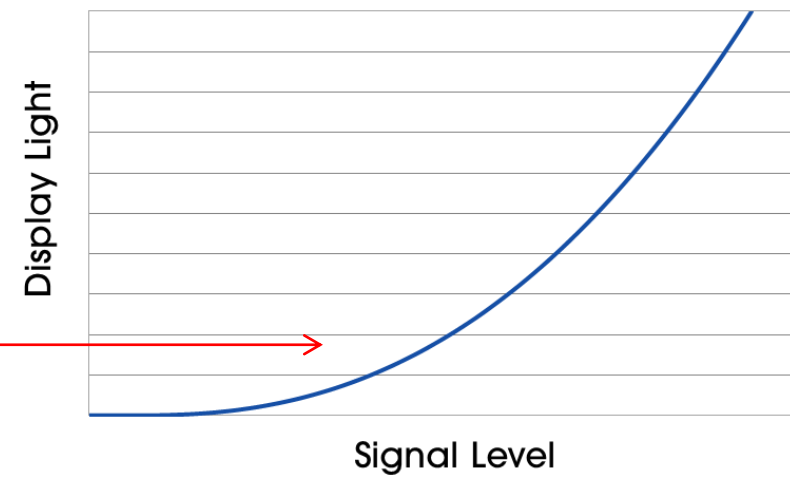
- 信号幅度与模拟量之间呈现非直线的曲线关系，表达函数为非线性方程
- 例如，视频信号采用非线性表达方式



# OETF、EOTF与OOTF



抵消



# OETF、EOTF与OOTF

## □ OETF (Opto-Electrical Transfer Function, 光电转换函数)

- 摄像机中，被摄景物光亮度转换为电信号的特性
- OETF就是传统电视体系中的“拍摄伽玛（摄像机伽玛）”



## □ EOTF (Electro-Optical Transfer Function, 电光转换函数)

- 监视器（电视机）中，电信号转换为显示光亮度的特性
- EOTF就是传统电视体系中的“显示伽玛（显像管伽玛）”



## □ OOTF (Opto-Optical Transfer Function, 光光转换函数)

- 包括艺术加工/调整，经过OETF/EOTF抵消后遗留的特性
- 从摄像机到监视器（电视机）的拍摄-显示系统总特性
- OOTF就是传统电视体系中的“系统伽玛”

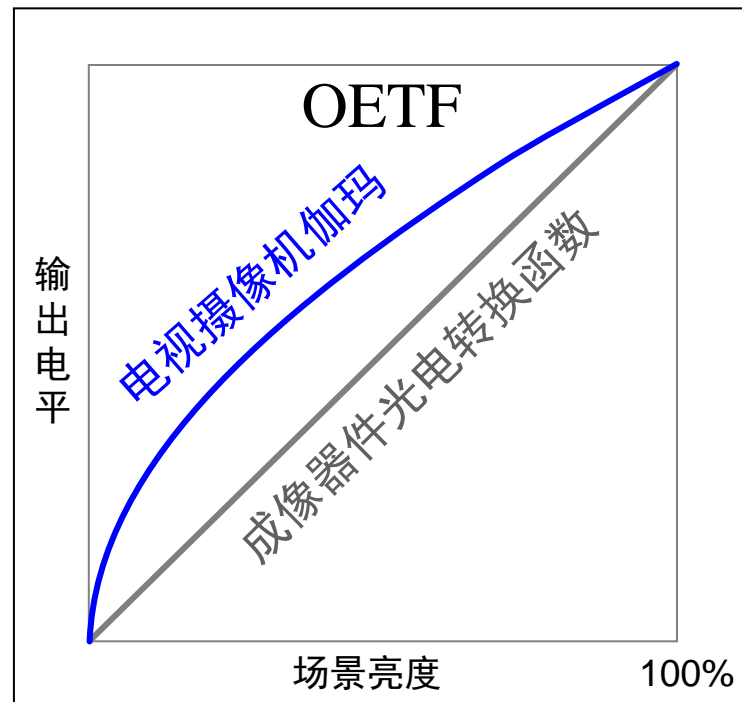


## □ 基本关系

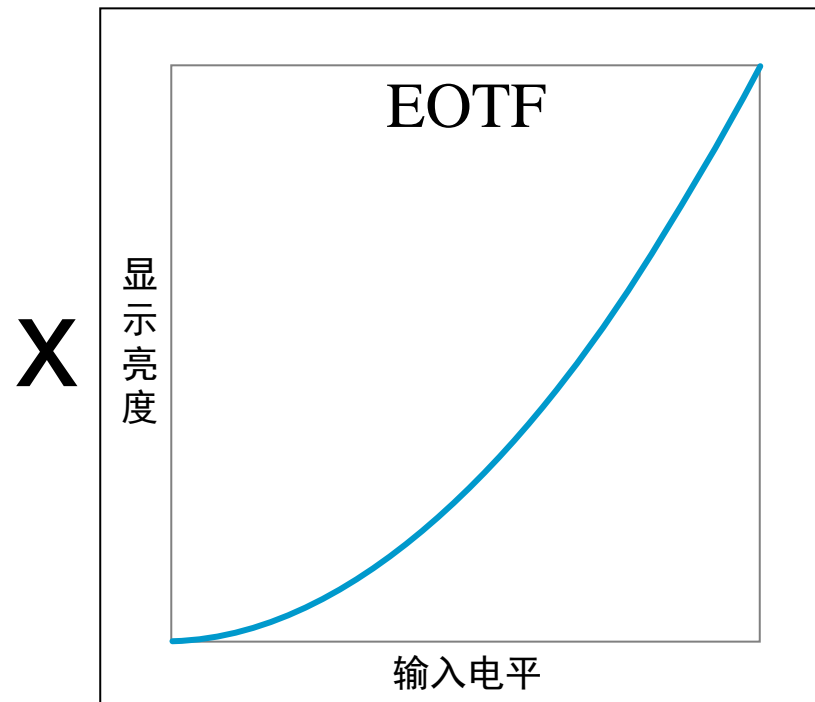
- $OETF = OETF \times EOTF$ ,  $OETF = OOTF \times EOTF^{-1}$ ,  $EOTF = OOTF \times OETF^{-1}$
- OETF, EOTF, OOTF三者中只要确定其中的两个，第三个就随之确定
- 特例：如果 $OOTF=1$ ，则 $OETF=EOTF^{-1}$ ， $EOTF=OETF^{-1}$ ，OETF与EOTF互为逆函数

# 伽玛的前世 – 显像管特性和电视伽玛

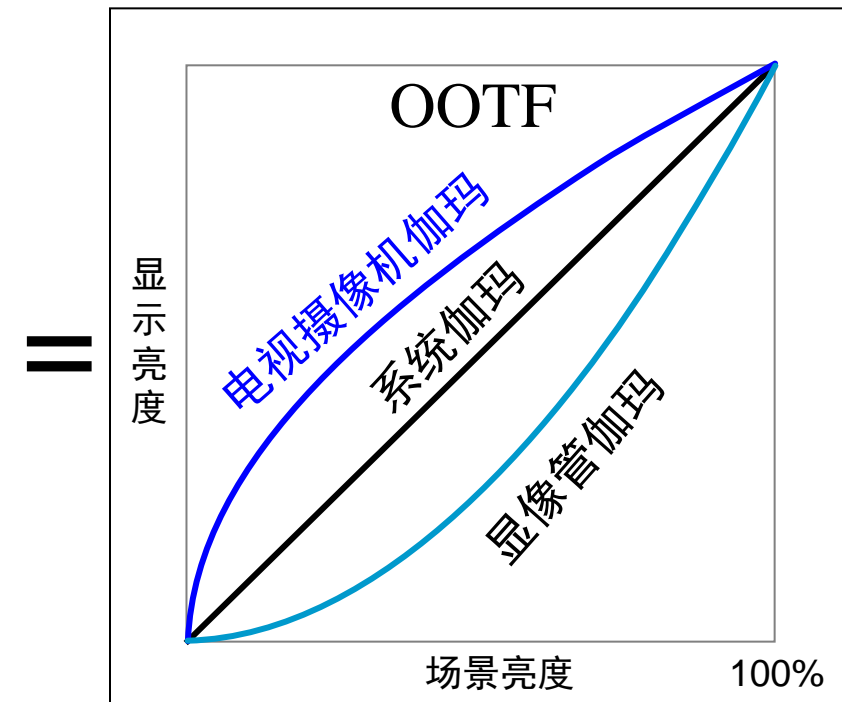
- 电视发展初期，可以大规模商业应用的显示器件只有显像管（CRT，阴极射线管）
  - 在显示端，阴极驱动时显像管原生电-光转换函数（EOTF，Electro-Optical Transfer Function）是非线性的
  - 在拍摄端，摄像机成像器件的原生光-电转换函数（OETF，Opto-Electrical Transfer Function）是线性的
  - 为了正确再现图像对比度（反差），需要对成像器件输出的线性信号进行“灰度预失真”的非线性处理，使其与显像管的灰度失真相反，以补偿显像管的非线性，使场景光与显示光的光-光转换函数（OOTF，Opto-Optical Transfer Function）是线性的，这就是电视的“伽玛校正”



摄像机伽玛特性  
 $1/\gamma = 1/2.2 \approx 0.45$



显像管伽玛特性  
 $\gamma \approx 2.2$



系统伽玛特性  
 $\gamma_t = 0.45 \times 2.2 \approx 1$

# 电视伽玛

## □ 显像管的输入电平与显示亮度之间呈现非线性的指数关系

■ 这个幂函数中的指数就是显像管的伽玛 ( $\gamma$ )，平均值约2.2，也称为显示伽玛

➤ 输入电平 $V$ 与显示亮度 $L$ 之间的函数关系为：

$$L = V^\gamma = V^{2.2}$$

■ 指数特性的显像管灵敏度与输入电压相关：输入电压越低灵敏度越低，输入电压越高灵敏度越高，相同的电压变化在高电平时产生的亮度变化比低电平时大得多

## □ 所有成像器件的光-电转换函数都是线性的，即 $\gamma = 1$

■ 如果把线性的成像器件输出信号直接送给 $\gamma = 2.2$ 的显像管，包括拍摄和显示在内的系统伽玛就是 $\gamma_t = 1 \times 2.2 = 2.2$

➤ 系统伽玛 $\gamma_t$  (OOTF) 大于1时显示图像的暗部层次被压缩而亮部层次被扩展其反差大于场景图像，OOTF = 1时显示图像的反差与场景相同，OOTF小于1时显示图像反差小于场景

■ 因为显像管的 $\gamma = 2.2$ ，是指数特性，所以在摄像机端需要用 $1/\gamma = 1/2.2 \approx 0.45$ 的对数特性进行校正，这就是摄像机伽玛，也称为拍摄伽玛

➤ 场景亮度 $L$ 与输出电平 $V$ 之间的函数关系为：

$$V = L^{1/\gamma} = L^{1/2.2} = L^{0.45}$$

■ 经过拍摄伽玛与显示伽玛处理后的系统伽玛 $\gamma_t = 0.45 \times 2.2 \approx 1$ ，显示与场景亮度呈线性关系

## □ 电视显示设备采用非线性，开始时是受制于显像管的非线性特性，是被动的

摄像机关闭伽玛校正后，系统伽玛 $\gamma_t = 2.2$ 时显示的图像



# 非线性比线性更合理

□ 尽管开始时是被动的，但实际上复杂的非线性比简单的线性更合理

■ 模拟时代传输电平是资源，线性就是平均地使用资源，非线性则是不平均地使用资源

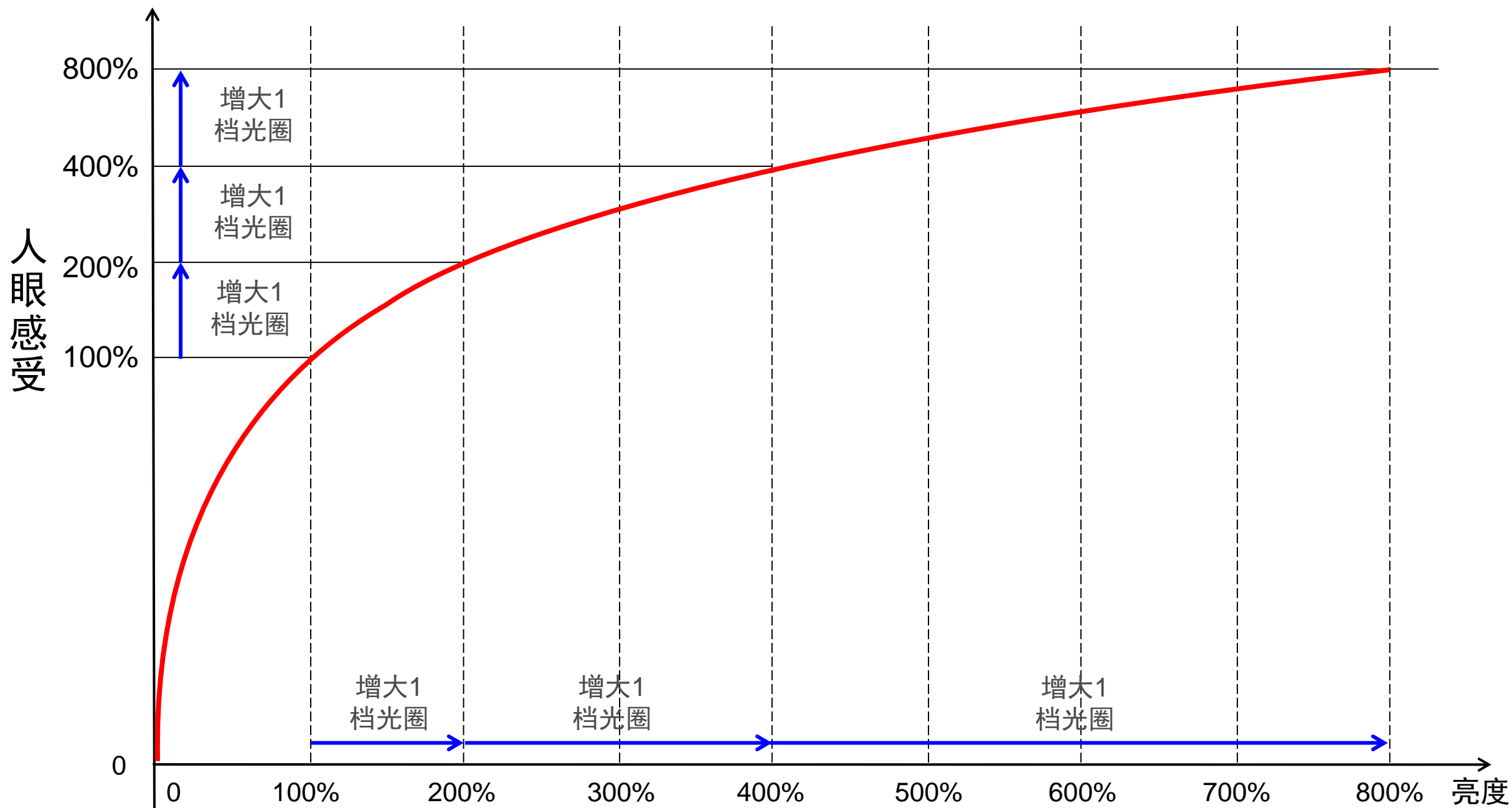
- 拍摄端：伽玛校正对成像器件输出的线性信号进行了非线性对数处理，电平（亮度）越低分配的电平资源越多，电平（亮度）越高分配的资源越少，相当于在传输前对信号的低亮度部分进行了“加重”处理
- 显示端：显像管的指数特性在输入电平越低时灵敏度越低，相当于对低亮度部分进行了“去加重”处理，这种资源分配方式提升了系统的信噪比

■ 人的视觉和听觉都不是线性而是非线性的对数特性

- 人眼观看的景物亮度越低灵敏度越高，亮度越高灵敏度越低
  - ❖ 例如，图像中噪波在所有亮度电平上是均匀分布的，但人眼只能看到暗部的噪波，而对同样幅度的亮部噪波则“视而不见”
- 利用人眼特性提升信噪比
  - ❖ 假设传输信道的噪波电平是固定的，在传输/记录前对信号进行的对数伽玛校正提升了图像信号的暗部电平，显示端显像管的指数特性降低了暗部的亮度，这种处理对图像的暗部噪波起到了明显的抑制作用
  - ❖ 利用人眼特性，非线性处理方式只需要线性方式一半的传输电平就可以达到相同的信噪比，或者说使用相同的电平资源时非线性方式能够达到的信噪比是线性方式的两倍

# 人眼的视觉特性（线性坐标）

人眼就像一个积分器，其视觉响应特性并不是线性的，而是非线性的对数特性



# 非线性的作用

## □用较少的资源实现更高性能

- 利用人眼特性，非线性伽玛用较少的资源实现了更高性能

## □合理使用资源

- 数字技术对信道噪波具有天然的免疫力，进入数字时代后传输和记录时噪波对信号的干扰不再是主要问题，但仍然需要合理使用资源
  - 与模拟时代的电平对应，数字视频的电平资源是量化比特代表的灰度阶，对数伽玛分配给暗部的灰阶多，亮度越高灰阶越少，这种非线性方式利用人眼特性提高了量化资源利用率
- 如果不用非线性伽玛，标清和高清电视广播采用8比特量化是不够的，非线性的伽玛节省了传输和存储资源

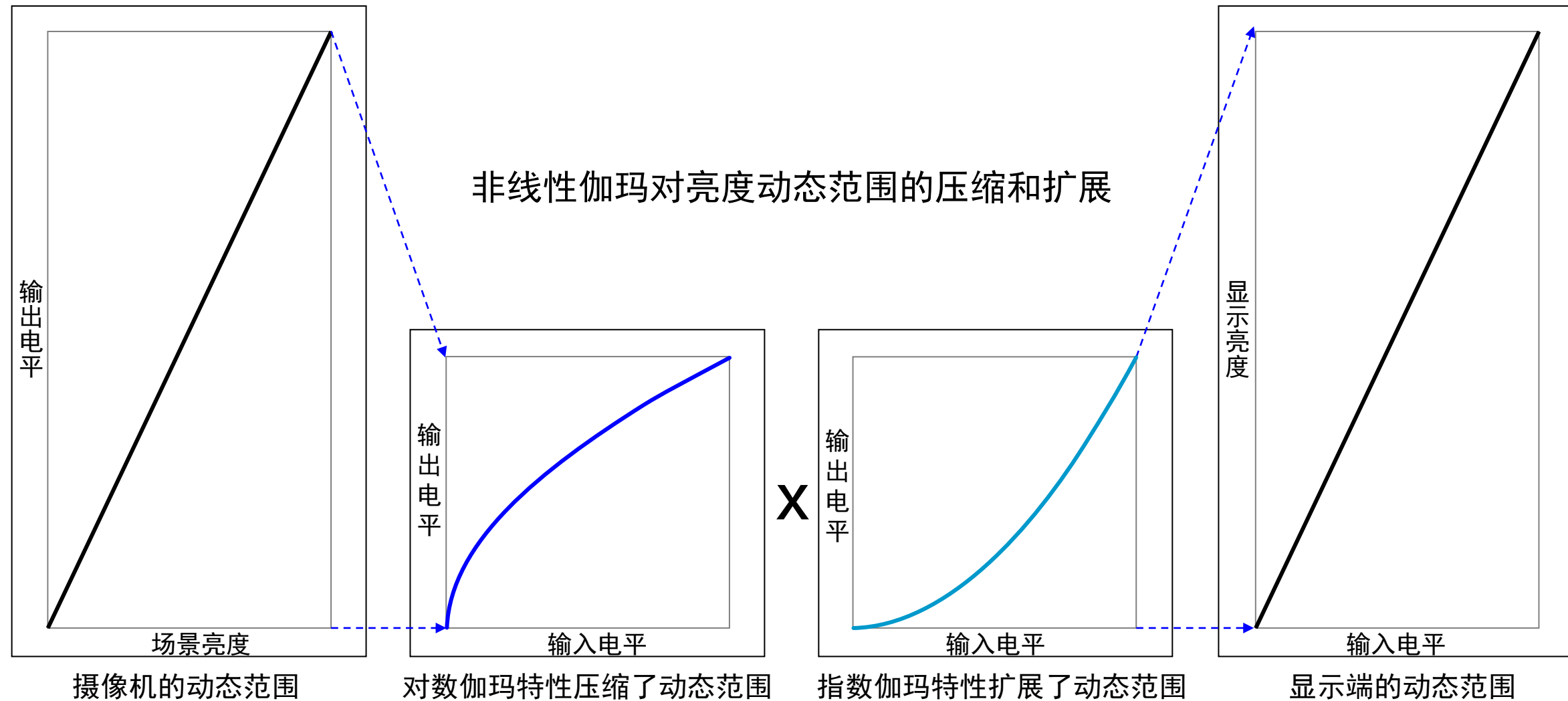
## □动态范围的压缩与扩展

- 从动态范围的角度看，非线性伽玛校正对亮度电平进行的处理，实际上是利用人眼特性在传输或记录前对动态范围进行了压缩，在显示时对动态范围进行了扩展
- 非线性伽玛校正的处理方式相当于把系统动态范围提高到了现有传输电平（量化比特灰阶数量）的2倍以上

# 伽玛的今生 – 伽玛的实际作用

在现代显示系统中伽玛的实际作用不是校正显示器件的非线性，而是

- 提高电平（量化）资源的利用率
- 扩展系统的动态范围



# 显示设备 – 没有显像管的显像管世界

□ 目前电子影像显示设备的“默认”特性都是显像管伽玛

■ 尽管从2000年开始显像管作为显示器件已经逐渐退出了历史舞台，但其特性却得以传承

□ 所有显示设备的EOTF都必须模拟显像管的非线性指数特性

■ 如液晶或OLED电视机、电视监视器、电脑显示器，DLP或液晶投影机、数字电影放映机，LED显示屏等，尽管这些设备中的显示器件原生特性都不是显像管伽玛

□ 显示伽玛的国际标准

■ 2011年国际电信联盟（ITU）发布了ITU-R BT.1886技术标准

➤ 目的：规范显示设备的特性，确保上述不是显像管的显示设备具有相同的性能

➤ 显示设备的伽玛值被定义为2.4，这也是标准动态范围（SDR）显示伽玛特性的国际标准

□ 显示设备产品

■ 所有显示设备产品都是非线性的，伽玛值都大于2.2

➤ 家庭电视机的伽玛为2.4~2.8，电脑显示器2.2~2.6，DCI/SMPTE标准的数字电影放映机伽玛为2.6

■ 市场上没有任何显示设备产品支持伽玛值为1的线性伽玛

➤ 因为显示设备都采用了非线性的显像管伽玛，所以线性的图像信号必须经过伽玛校正才能正常显示

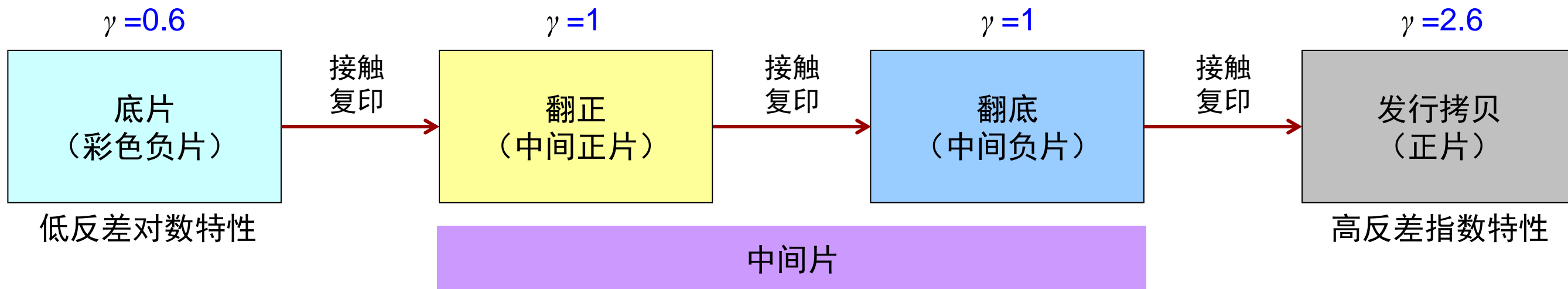
# 电影胶片的伽玛特性

低反差图像，能再现所有灰度层次，但不能正确再现对比度，特别是人脸面部18%灰

正常对比度图像



系统伽玛： $0.6 \times 1 \times 1 \times 2.6 = 1.56$



信息量 (分辨率、灰度层次) 递减

# 电影胶片的伽玛特性

## □与电视摄像机相似，拍摄底片（彩色负片）是伽玛值小于1的低反差对数特性

- 底片伽玛值为0.6，与电视摄像机的伽玛值0.45相近，再现低反差负像

- 底片经过光学曝光的接触复印后得到翻正，翻正片是伽玛值为1的线性特性，只是把底片的负像转换成了正像并不改变伽玛值
- 剪接后的翻正片再经过接触复印得到翻底，翻底片也是伽玛值为1的线性特性，并不改变伽玛值，翻底用于印制发行拷贝

- 拍摄底片采用对数特性的作用

- 利用人眼的非线性对动态范围进行压缩，用有限的胶片密度资源记录更高的亮度动态范围

## □与显像管相似，发行拷贝是伽玛值大于1的高反差指数特性

- 放映（显示）时发行拷贝必须用指数特性对压缩了的动态范围进行扩展

## □胶片电影的系统伽玛

- $\gamma_t = 0.6 \times 2.6 \approx 1.56$ （放映拷贝伽玛为3时 $\gamma_t = 0.6 \times 3 \approx 1.8$ ）

- 为适应影院的黑暗观看环境和低亮度的投影图像，胶片电影的系统伽玛 $\gamma_t$ 比电视的系统伽玛大

- 银幕上放映的画面对比度比电视图像和实际场景高

## □胶片电影也是非线性伽玛

- 去掉胶片特有的正片、负片和不影响伽玛特性的中间片因素，胶片电影的拍摄和电视摄像机一样也是非线性的对数特性，放映（显示）和显像管一样也是非线性的指数特性

## □胶片的非线性伽玛是有意为之

- 通过调整感光乳剂配方和冲印工艺，胶片的感光特性既可以是非线性的对数和指数特性，也可以是线性的

- 因此，胶片的拍摄和放映采用对数和指数特性并不像电视一样是被动的，而是主动的有意为之

# 模拟电视与胶片电影的比较

## □ 胶片电影与电视殊途同归

- 两者都是利用人眼的对数特性，采用非线性伽玛合理利用资源，压缩传输和记录的动态范围，达到了用尽可能少的资源实现更高性能的目的

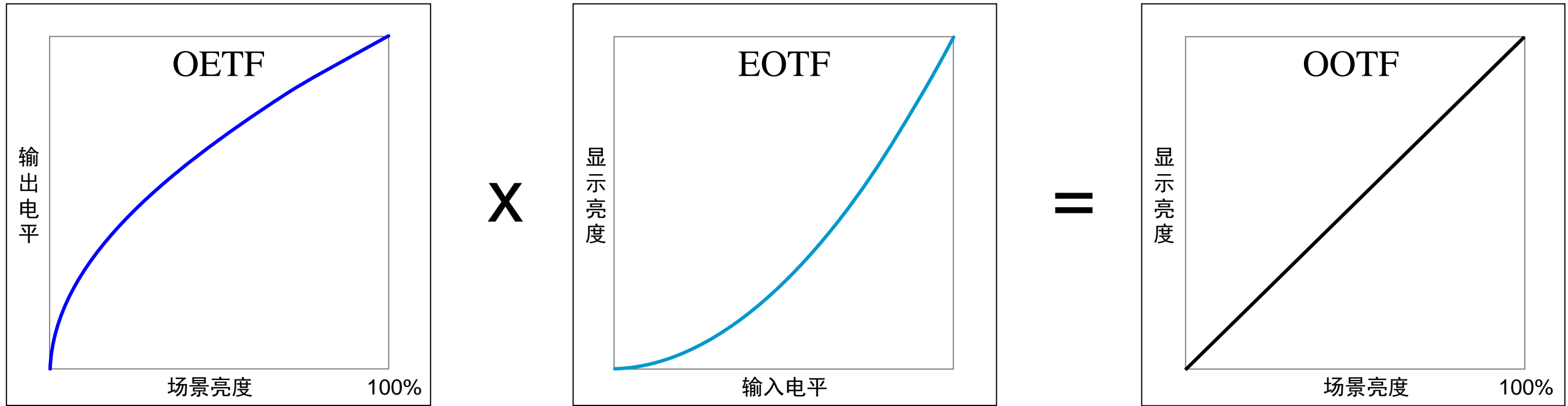
## □ 低反差拍摄与高反差显示

- 对比电影和电视，比较对数特性的低反差图像与指数特性的高反差图像之间的差别，可以直观地看到非线性伽玛校正如何在拍摄时压缩、显示时扩展动态范围，并在终端呈现正常对比度图像

## □ 低反差拍摄是为了节省记录和传输资源

- 低反差的伽玛再现了更多灰度层次，把很大的动态范围压缩到了较小的对比度范围内
- 高反差的指数伽玛扩展了动态范围和对比度但损失了灰度层次，这两种灰度失真的图像都不是正常的对比度
- 传输和记录这种压缩了动态范围的信号比处理线性信号更节省资源

# 不同伽玛特性的图像



对数伽玛  $\gamma = 0.45$



指数伽玛  $\gamma = 2.2$



线性伽玛  $\gamma = 0.45 \times 2.2 \approx 1$

# 现代电视系统的伽玛特性（SDR）

## □早期电视系统

- 早期电视系统拍摄与显示伽玛互为反函数，OETF与EOTF是互逆的关系
- $OETF=1/2.2 \approx 0.45$ ， $EOTF=2.2$ ， $OOTF=OETF \times EOTF=0.45 \times 2.2=1$

## □现代电视系统

- SDR摄像机的拍摄伽玛是BT.709
- 显示伽玛是BT.1886
- 两者特性相反但并不是完全的互逆关系
- SDR电视体系的OOTF并不是线性的1，而是大于1的非线性指数特性

## □拍摄（摄像机）伽玛的国际标准

- 1993年ITU发布的ITU-R BT.709定义了拍摄（摄像机）伽玛
- 基于伽玛值0.45进行了修改，是SDR（标准动态范围）拍摄、制作的国际标准
- 修改后实际的伽玛值接近0.5，而不是0.45

## □显示伽玛的国际标准

- 2011年ITU发布了ITU-R BT.1886技术标准定义了显示伽玛
- 显示设备的伽玛值被定义为2.4，而不是2.2

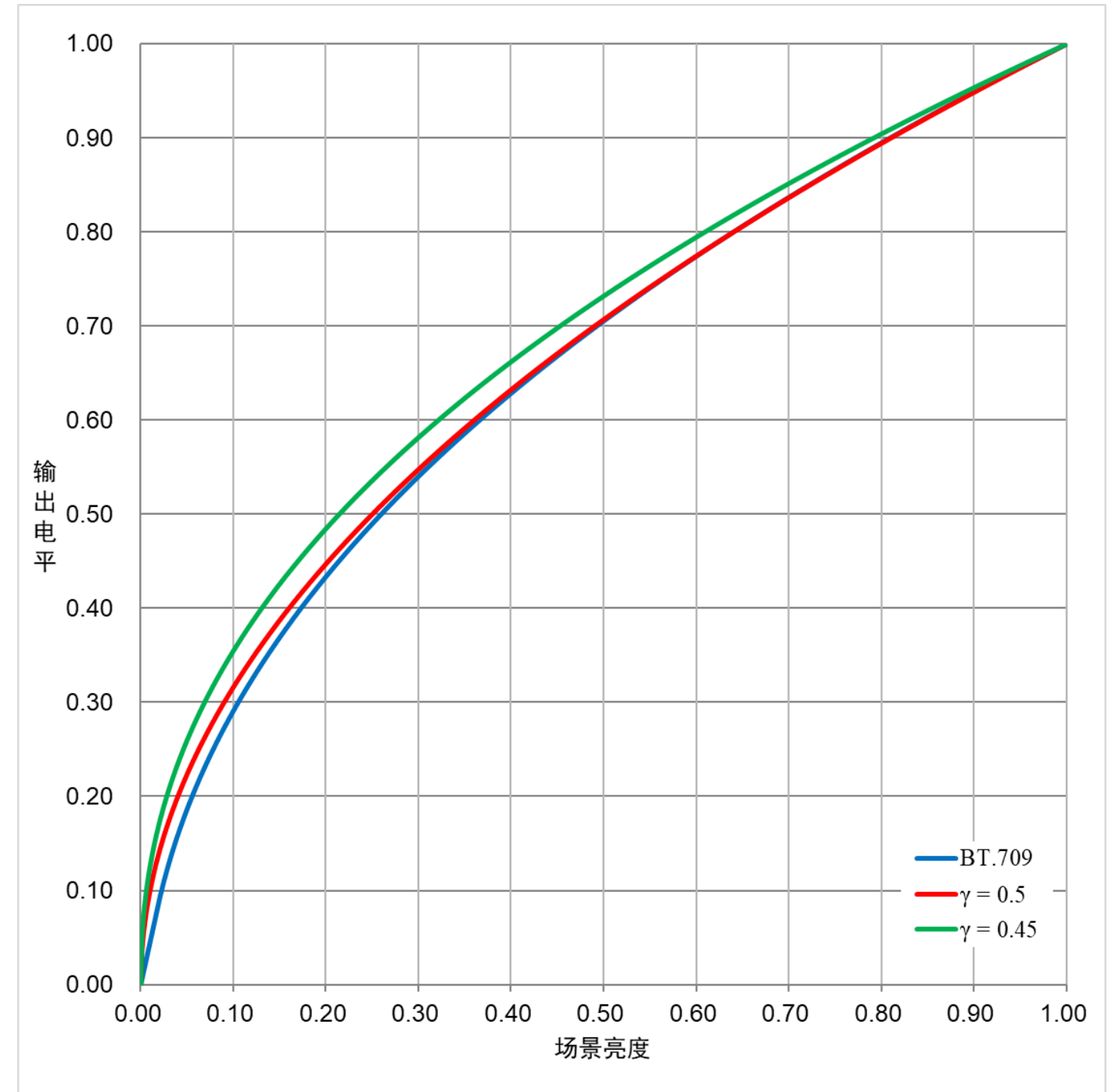
# BT.709拍摄伽玛

## BT.709把摄像机伽玛分成了两段

- 低于1.8%电平的暗部为斜率4.5的线性特性
- 高或等于1.8%电平的特性仍然基于指数为0.45的幂函数，但做了乘以1.099的系数后减去0.099的修改，如下式所示：

$$\begin{aligned} V &= 1.099 L^{0.45} - 0.099 & \text{for } 1 \geq L \geq 0.018 \\ V &= 4.500 L & \text{for } 0.018 > L \geq 0 \end{aligned}$$

- 指数为0.45的幂函数乘以1.099减去0.099是为了降低暗部亮度以减轻屏幕反光的影响
- 但该函数在场景亮度低于0.0047（0.47%，归一化）时电平为负值，为防止出现非法的负电平，电平低于0.018（1.8%）时采用斜率为4.5的线性特性
- 经过修改后，实际上 $V = 1.099 L^{0.45} - 0.099$ 的函数特性与 $V = L^{0.5}$ 更接近，而与 $V = L^{0.45}$ 的差别较大，因此BT.709摄像机伽玛的近似值是0.5，而不是0.45
- 从2007年1月发布的BT.601-6开始，ITU建议标清电视也采用与BT.709高清相同的伽玛



# BT.1886显示伽玛

□为适应不同亮度的显示面板，BT.1886对指数2.4的幂函数做了一些参数调整，其定义为：

$$L = a(\max[(V + b), 0])^\gamma$$

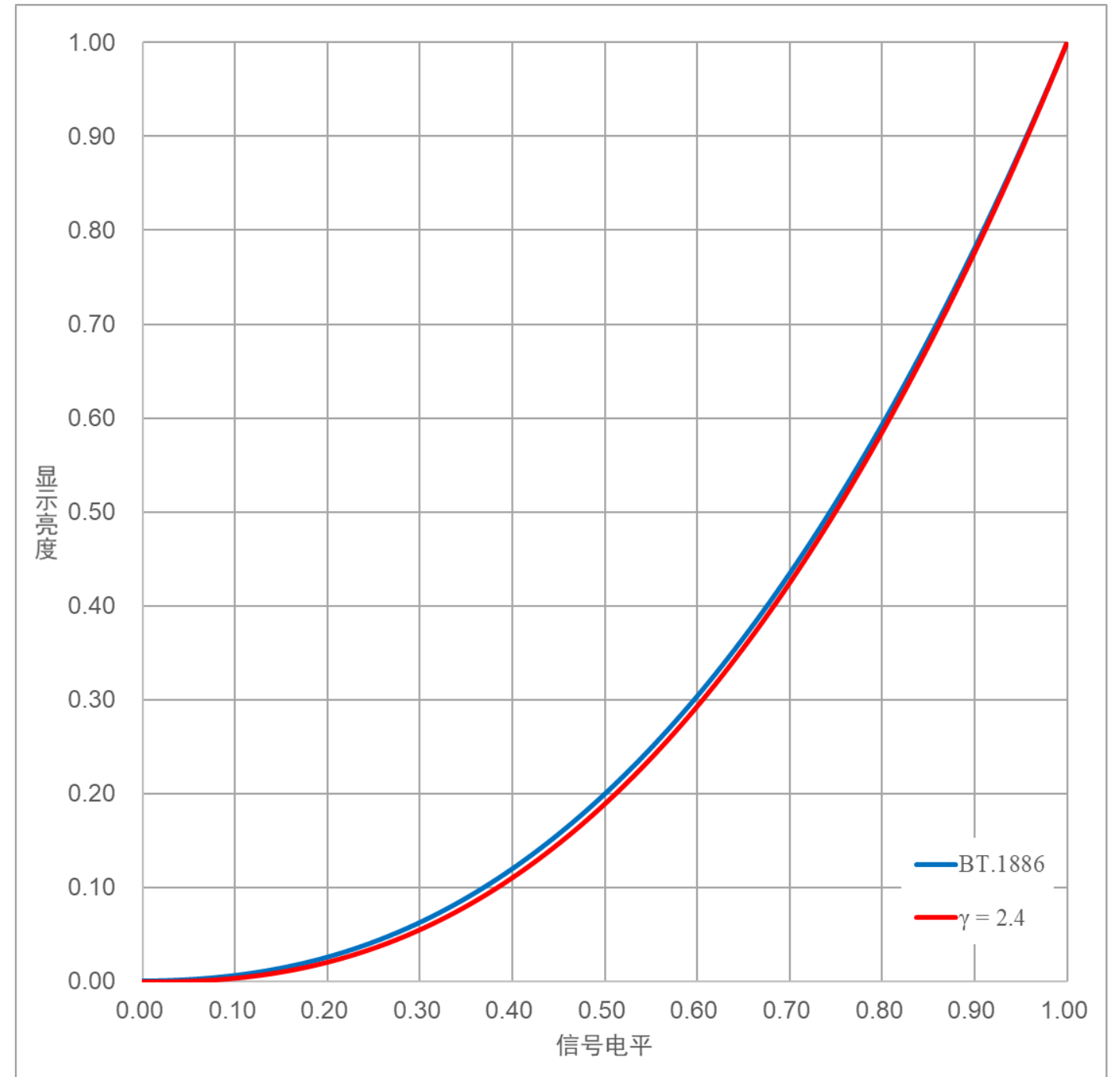
□式中， $\gamma$ 是幂函数2.4， $a$ 为用户增益调整，相当于传统监视器的“对比度”， $b$ 为黑电平偏移，相当于传统监视器的“亮度”，两者由显示面板的白色（最高）亮度 $L_W$ 与黑色（最低）亮度 $L_B$ 以及 $\gamma$ 由下述公式计算得出：

$$a = (L_W^{1/\gamma} - L_B^{1/\gamma})^\gamma \quad b = \frac{L_B^{1/\gamma}}{L_W^{1/\gamma} - L_B^{1/\gamma}}$$

□而 $a$ 与 $b$ 变量是通过下述公式得出的，以确保 $V = 1$ 时 $L = L_W$ ， $V = 0$ 时 $L = L_B$ ：

$$L_B = a \cdot b^\gamma \quad L_W = a \cdot (1 + b)^\gamma$$

□ $L_B = 0$ 时其特性与 $L = V^{2.4}$ 完全相同， $L_B$ 很低时两者非常接近，图为 $L_B = 0.0001$ （归一化）时BT.1886与伽玛2.4的比较



# SDR的OOTF

## □SDR电视的OETF与EOTF不是互逆的关系

- 拍摄与显示伽玛不互为反函数：BT.709拍摄伽玛（OETF）近似值为0.5，BT.1886显示伽玛（EOTF）为2.4
- $SDR\ OOTF = OETF \times EOTF = BT.709 \times BT.1886 \approx 0.5 \times 2.4 = 1.2$
- 在显示亮度比场景亮度低得多的情况下，人眼视觉的环绕效应使再现的图像对比度“看起来”比实际场景低
- 由于电视系统伽玛（OOTF）近似值为非线性的1.2而不是线性的1，所以监视器和电视机显示图像的对比度、彩色饱和度比实际场景高，补偿了环绕效应造成的视觉对比度下降，再现的图像“看起来”更漂亮

## □胶片电影

- 拍摄与显示伽玛不互为反函数：底片拍摄伽玛0.6，放映拷贝显示伽玛2.6 ~3
- 胶片电影的系统伽玛： $0.6 \times 2.6 = 1.56$ （放映拷贝伽玛为3时系统伽玛 $\gamma_t = 0.6 \times 3 \approx 1.8$ ）
- 系统伽玛大于1，显示图像的反差和彩色饱和度比实际场景高，补偿了环绕效应造成的视觉对比度下降

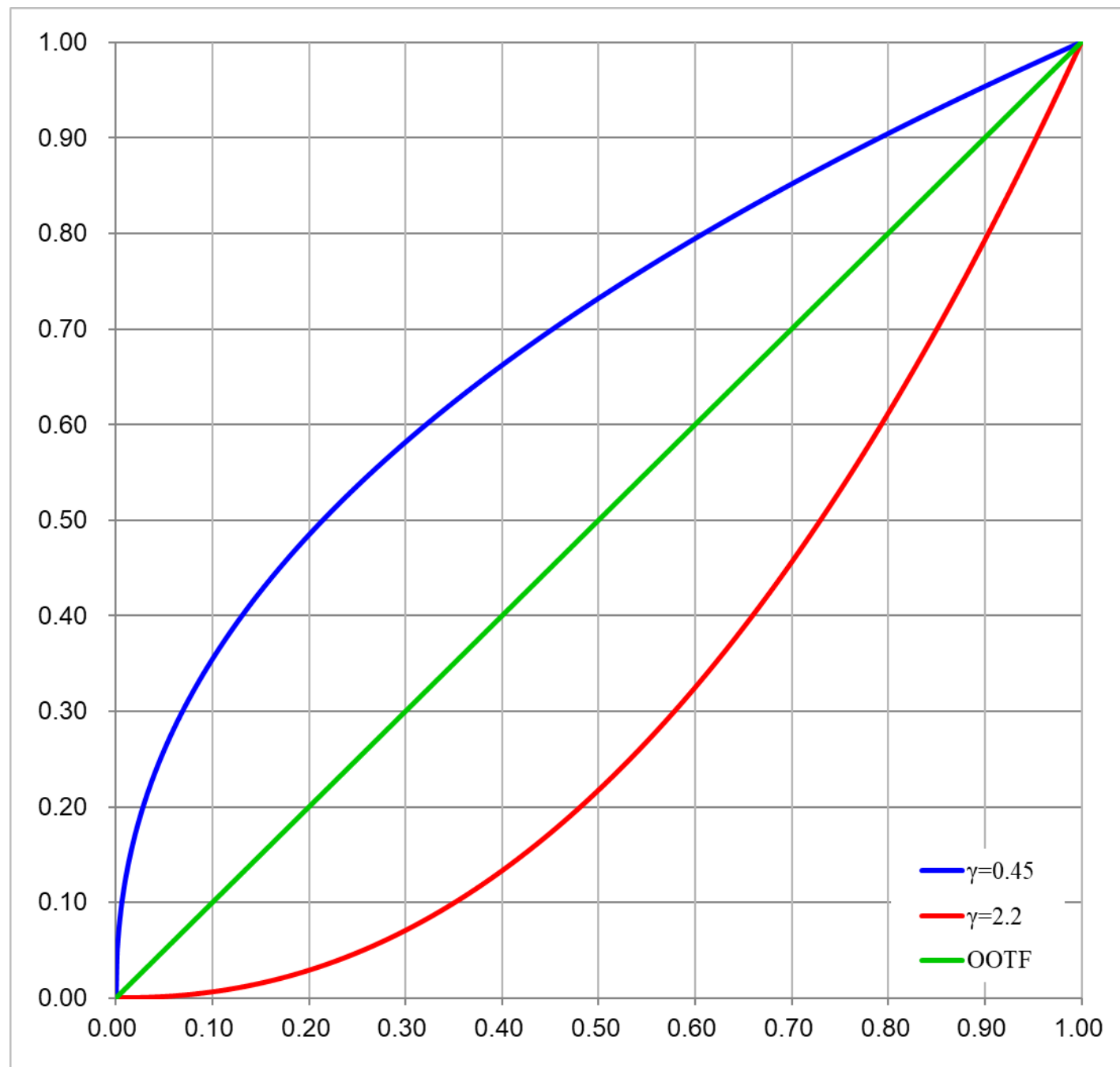
## □漂亮比真实更重要

- 从电影时代开始，观众不但接受而且喜爱、习惯了这种反差和彩色饱和度比实际场景大的图像，这种灰度和彩色略有失真的图像看起来更漂亮、通透，彩色更鲜艳，就像手机拍照流行的“美颜”一样
- 早在BT.1886发布之前很多电视机的伽玛就已经是2.4而不是2.2，原因是电视机厂商为使画面看起来更漂亮用信号处理的方法把电视机显示伽玛提高到了2.4，BT.1886把显示伽玛定义为2.4只是承认了这个现实

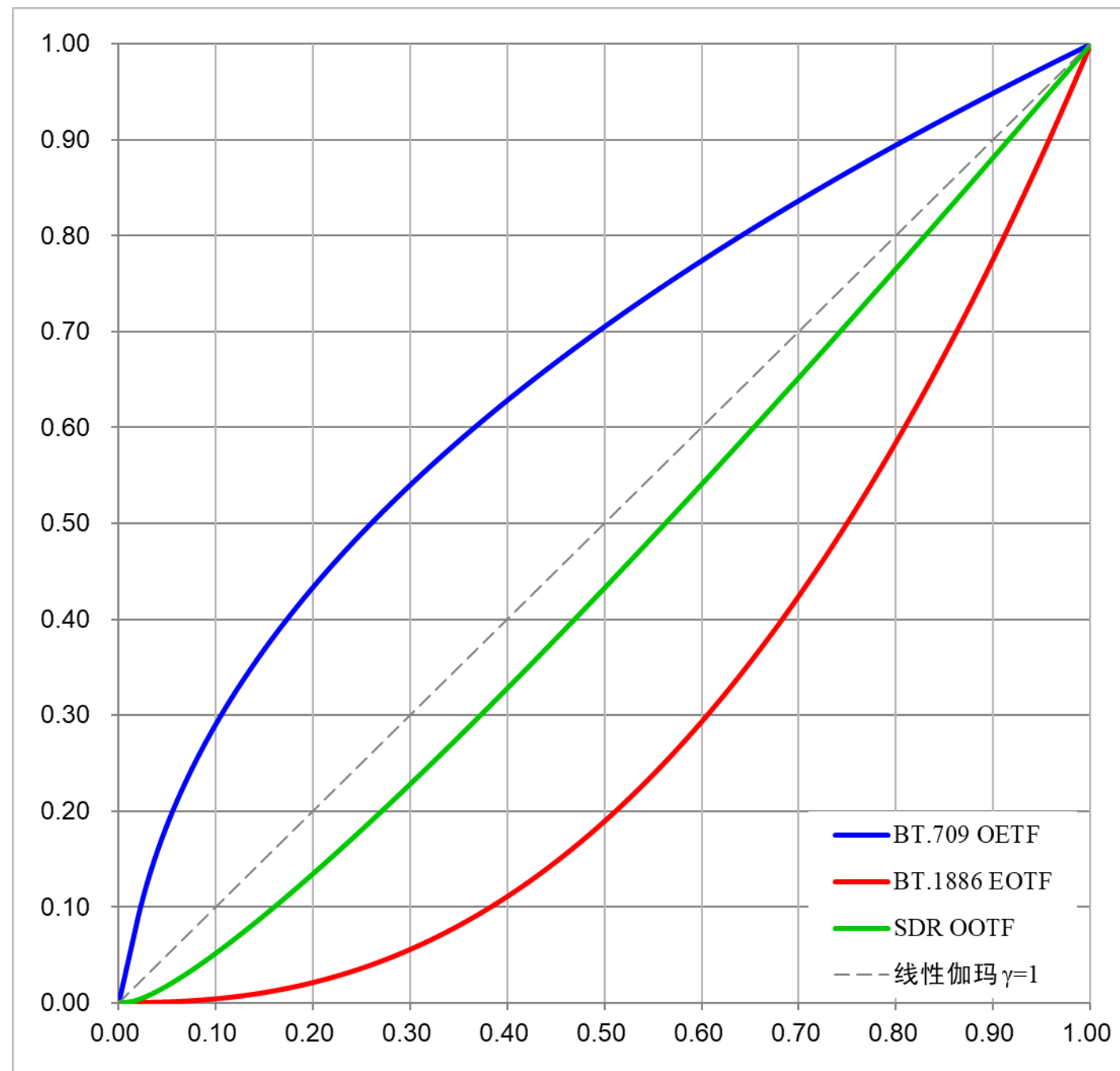
## □SDR电视的系统伽玛1.2已经成为电视行业OOTF的基准

- 包括HLG和PQ，HDR电视的OOTF都沿用了SDR电视的系统伽玛1.2，以保持与SDR电视相同的观感

# 早期与现代电视系统的伽玛特性比较（归一化）



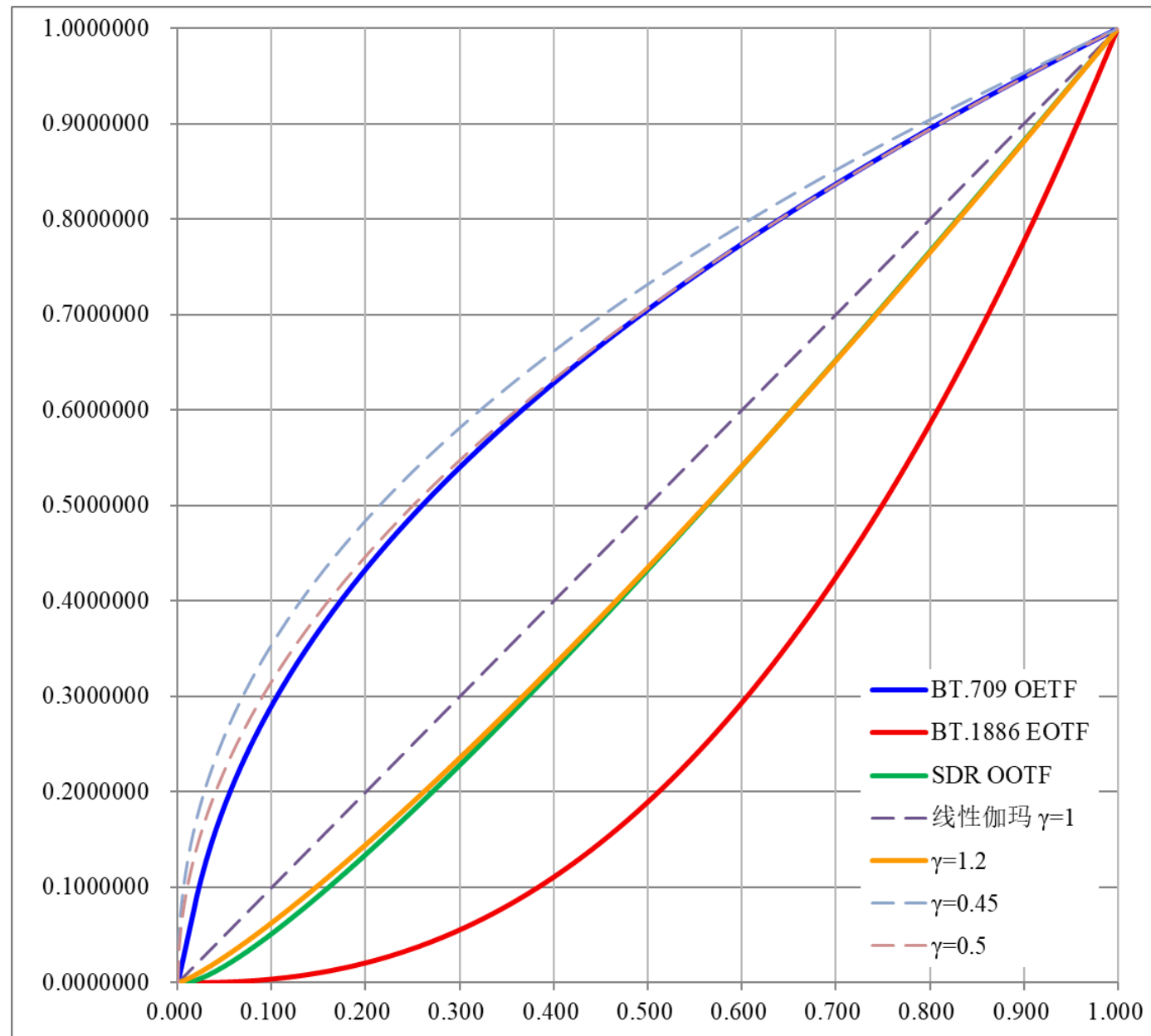
早期电视系统伽玛特性（归一化）



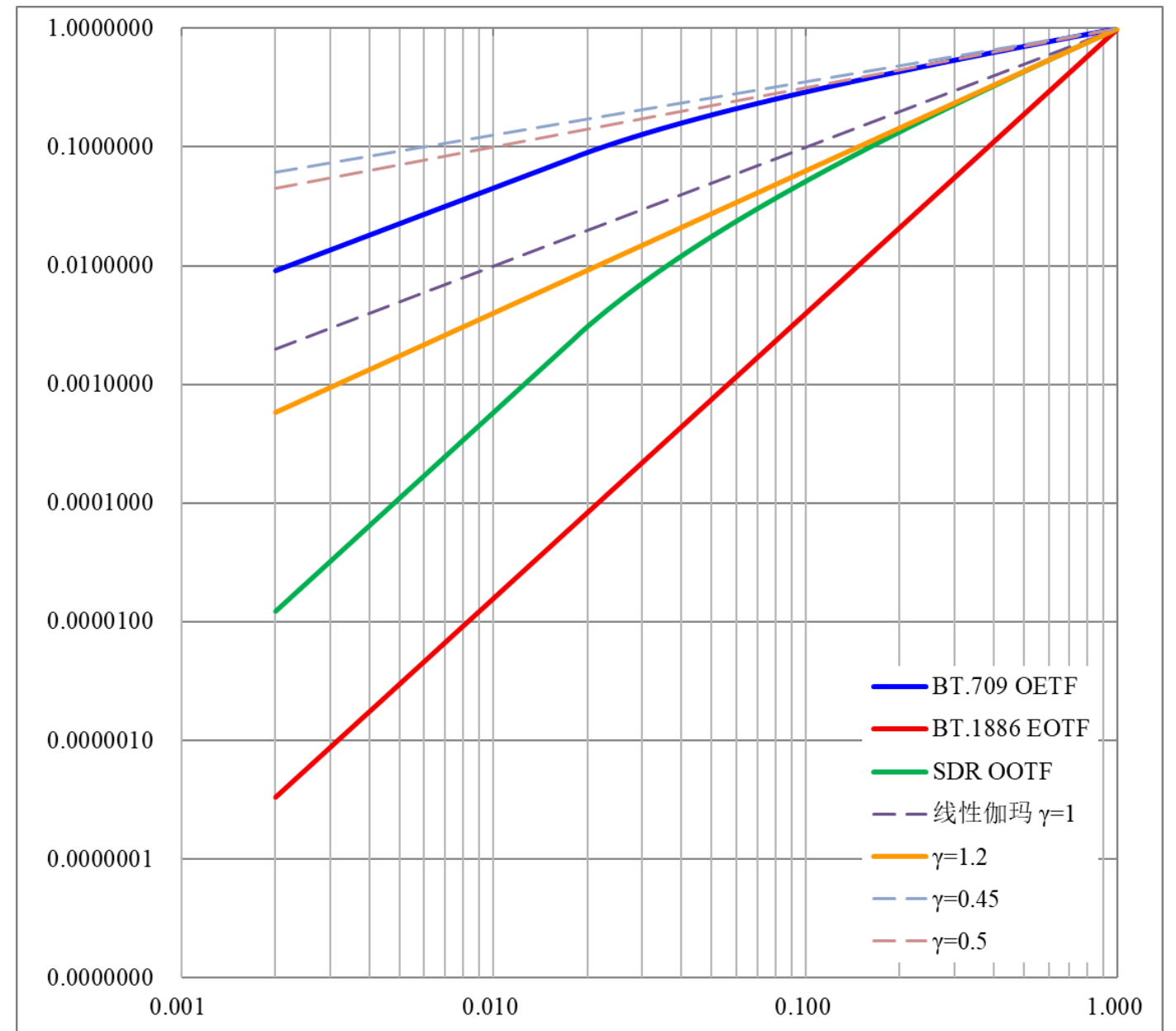
现代电视系统伽玛特性（归一化）

# 用对数坐标看伽玛

- 用线性坐标表示电视伽玛OETF、EOTF、OOTF时其函数曲线是非线性的
- 如果把线性坐标改为非线性对数坐标，由于指数与对数互为反函数，其特性曲线就是“线性”的



SDR电视系统伽玛特性（线性坐标，归一化）



SDR电视系统伽玛特性（对数坐标，归一化）

# 用对数坐标看伽玛

## □ 人眼的灵敏度与对数特性相近

- 对数坐标比线性坐标更真实地反映了人眼对亮度的感受

## □ 在对数坐标系里不同的伽玛值都是“线性”的

- 伽玛值越大其“斜率”越大，这样的函数曲线有助于从另一个角度理解伽玛

- BT.1886 EOTF显示伽玛值为2.4，“斜率”最大

- 伽玛值越大显示图像的反差（对比度）越大，伽玛值越小显示图像的反差（对比度）越小

- BT.709拍摄伽玛的特性分为两段

- 亮部伽玛值大约为0.5，暗部的伽玛值大一些

- $SDR\ OOTF = BT.709\ OETF \times BT.1886\ EOTF$

- 因为BT.709的特性分为两段，SDR OOTF的特性也分为两段

- ❖ 峰值亮度100尼特时显示亮度高于10尼特的亮部伽玛值大约为1.2，低于1尼特的暗部伽玛值大一些

- 系统伽玛=1.2时显示图像的反差（对比度）大于实际场景

- 显示亮度低于1尼特的暗部图像反差比亮部大

# 影视行业常用的伽玛

## □显示伽玛

- 电视行业的BT.1886和电影行业的DCI（数字影院倡导联盟）
- 这两种伽玛都是用于标准动态范围（SDR）的
  - BT.1886的伽玛值2.4，适用于亮度范围70~400尼特、基准峰值亮度100尼特的监视器以及各种显示设备，8~10比特，配合使用的色域是BT.709
  - BT.1886不但应用于高清与标清SDR电视监视器，还被民用电视机、电脑显示器、智能手机和平板电脑显示屏、投影机、LED显示屏等显示设备广泛使用
  - DCI的伽玛值2.6，适用于峰值亮度48尼特的数字影院放映机，12比特，配合使用的色域是DCI-P3

## □拍摄伽玛（SDR）

- 电视：BT.709，伽玛值约为0.5
- 所有SDR摄像机、监控摄像头、手机摄像头等各种拍摄设备内置的都是BT.709拍摄伽玛
- 与其匹配的显示伽玛是BT.1886，配合使用的色域是BT.709

## □高动态范围（HDR）电视

- BT.2100推荐了感知量化（PQ）和混合对数（HLG）
- ITU建议现阶段制作这两种伽玛的节目时使用峰值亮度1000尼特HDR监视器
- 配合使用的色域是BT.2020

# 影视行业常用的伽玛

## □ 高动态范围（HDR）电影

- 目前还没有确定统一的国际标准或行业标准
- 两个正在推广的企业标准分别是Dolby Vision和Eclair Color
- Dolby Vision采用PQ伽玛，峰值亮度108尼特
- Eclair Color的伽玛值2.8，峰值亮度103尼特

## □ 对数和线性伽玛

- 影视制作还使用柯达的Cineon以及与之类似的多种厂商定义的对数伽玛如Log C、S-Log3、C-Log、V-Log、RED Log等
- 摄影机原始数据RAW和特技制作交换的OpenEXR也使用16比特线性伽玛
- 这些对数和线性伽玛只用于制作流程中的素材记录和文件交换等中间环节，与成品节目无关

# 拍摄与显示伽玛的匹配

## □ 数字电影

- 电影放映机的显示伽玛为2.6，比BT.1886的2.4大一些
- 用数字放映机显示为电视制作的图像时其系统伽玛 $\gamma_t = 0.5 \times 2.6 = 1.3$
- 显示图像的反差比电视大一些
- 在电视上显示为电影放映制作的图像时由于其显示伽玛2.4比电影的2.6小，显示图像的反差比电影画面小一些

## □ 电视的BT.709色域小于电影的P3色域

- 在电视上直接显示为电影制作的图像时不但对比度小一些彩色饱和度也会下降
- 对高质量节目来说这是不能忽略的

## □ 为电影制作的节目用于电视播出时需要制作专门的电视版

- 电视版的伽玛和色域应符合电视的行业标准

## □ HDR电视与SDR的伽玛特性差别非常大

- 显示与拍摄伽玛不匹配时灰度和彩色失真要大得多，特别是PQ

# 电视与电影动态范围表达方式的差别

## □用词不同

- 电视用动态范围（Dynamic Range），电影用宽容度（Latitude）

## □基准不同

- SDR电视时代行业惯例是以90%反射率白为基准，动态范围用百分比表示，是相对概念
- 电影以18%反射率灰为基准，宽容度用光圈档数表示，是绝对概念

电 视		电 影	
名称	动态范围（Dynamic Range）	名称	宽容度（Latitude）
定义	SDR电视以90%反射率白为基准，对应100%动态范围，超过基准的动态范围用百分比表示	定义	以18%反射率灰为基准，对应0档光圈，低或高于基准的宽容度用下/上（欠曝光/过曝光）光圈档数表示
说明	广播级电视摄像机的动态范围一般为600%，即曝光量是正常拍摄的6倍（增大2.6档光圈）时90%白对应的输出电平不削波	说明	常用的彩色负片宽容度为12至14档光圈，例如KODAK 5284的宽容度为-7/+5共12档光圈，5218为-7/+6共13档光圈，5219为-6/+8共14档光圈
	因为90%白是18%灰反射率的5倍，相当于增加2.3档光圈，所以600%动态范围相当于以18%灰为基准时过曝光宽容度 $2.6+2.3=4.9$ 档光圈		常用的数字摄影机宽容度为12至14档光圈，例如基准灵敏度时F35的宽容度为-6.7/+5.3共12档光圈，F65为-8/+6，ALEXA为-6.6/+7.4共14档光圈
	摄像机性能只标示动态范围，即90%白的过曝光宽容度，不标示欠曝光宽容度和总宽容度		数字摄影机和电视摄像机调整灵敏度时不会改变总宽容度，只是改变了欠曝光与过曝光宽容度的比例

# 拐点

## □ 动态范围

- 用百分比计量视频信号电平时，100%电平代表100% 动态范围
- SDR时代并未定义测试摄像机动态范围使用的测试卡类型
  - 行业惯例是拍摄90%反射率白卡，调整曝光量使90%白输出电平为100%（700mVp-p），对应亮度信号的100%动态范围，在监视器上显示100尼特峰值白亮度
- 按理论值处理时SDR摄像机的动态范围只有100%，没有电平和亮度资源表现超过100%动态范围的高光

## □ 电平和亮度的上限

- 对传输来说电平是资源，100%电平是上限，对显示来说亮度是资源，100尼特是上限，因为100尼特是显像管峰值亮度的典型值，100%电平对应100尼特亮度
- 电视只能再现100%动态范围当然是不够的，比照胶片电影，在有限的电平和显示亮度资源范围内，电视系统希望能够再现的动态范围是300~600%，即能够再现超过测试白卡3至6倍亮度的灰度层次

## □ 拐点

- 受限于电视信号的幅度和显像管亮度，只能在这个有限的范围内再现大于100%的动态范围
- SDR电视处理这个问题的方法是拐点，即用90%左右的大部分信号电平表现100%动态范围以内的灰度层次以正确再现人脸面部或拍摄对象主体
- 剩余10%左右的少量电平表现100~600%动态范围的高光层次，使其被拐点压缩在很小的电平和亮度范围内

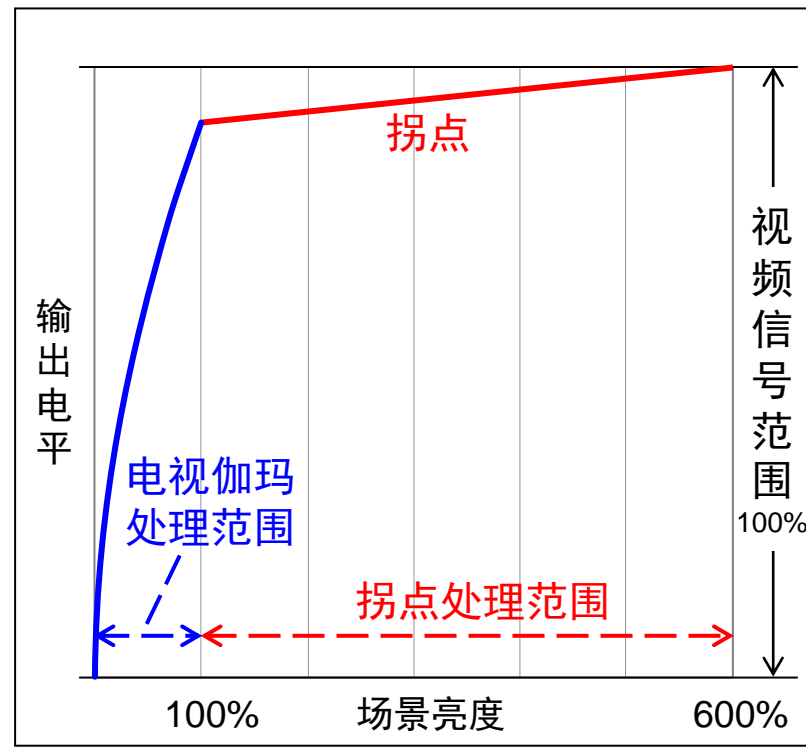
## □ 模拟电视发射机对信号电平的限制

- 模拟电视采用负极性调制，信号电平不允许超过1Vp-p，否则会出现载波中断、电视发射机过载的风险
- 为了在输出电平不超限的情况下提高动态范围，摄像机都采用了这种伽玛+拐点的处理方式
- 加入拐点后摄像机的伽玛特性与理论值略有不同

# SDR摄像机的实际伽玛特性

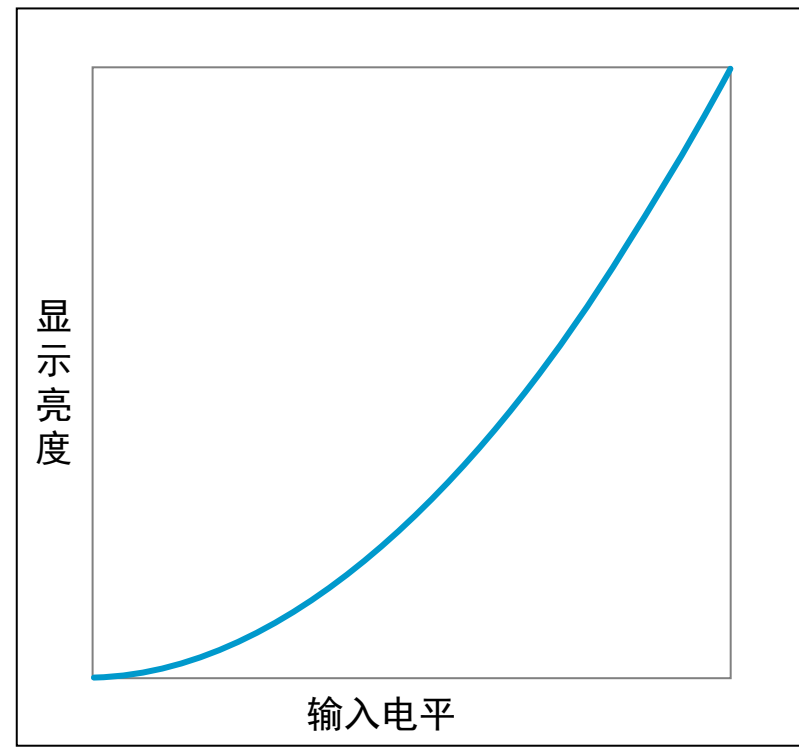
□ SDR摄像机拐点分配给高亮度部分的电平资源只有10%左右

- 由于显示伽玛的非线性指数特性，位于高电平端的10%电平对应的亮度资源大约为20%，但对于100~600%的亮度动态范围来说亮度资源仍然非常有限
- 在实际的产品上不同摄像机厂商对拐点的处理并不相同，广播级摄像机允许用户在一定范围内对拐点进行调整，所以10%电平只是个大致范围
- 拐点处理也被称为“软削波”、“软限幅”，是一种处理超限信号的常用方法

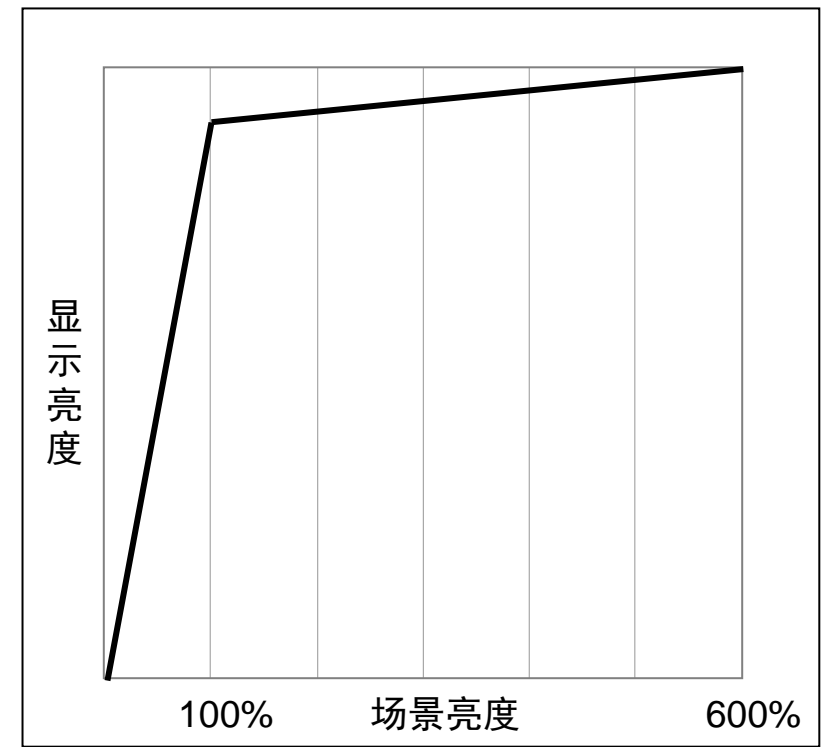


增加拐点处理后实际的  
摄像机伽玛  $\approx 0.5$

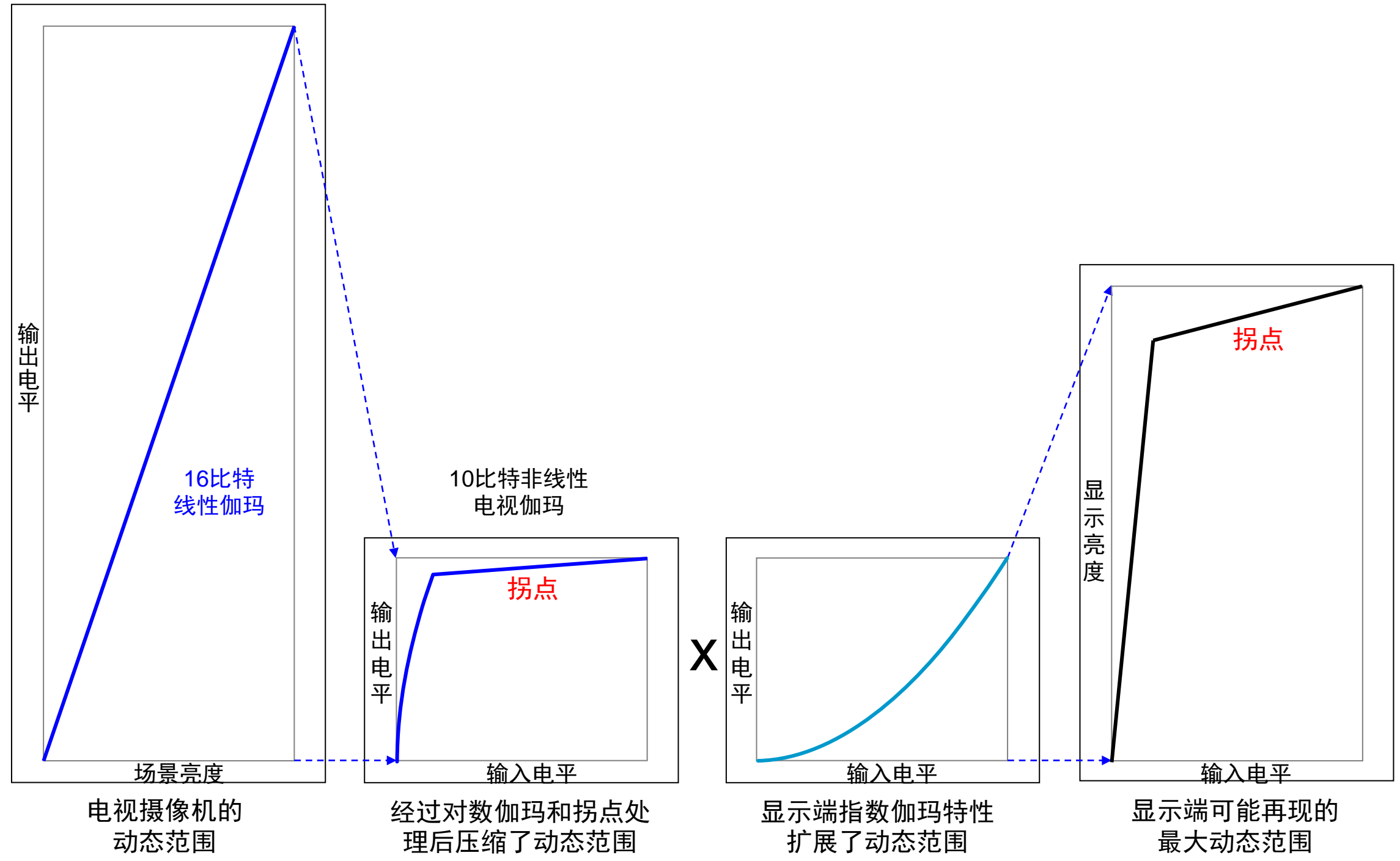
X



=



# 加入拐点后电视伽玛对动态范围的压缩、扩展

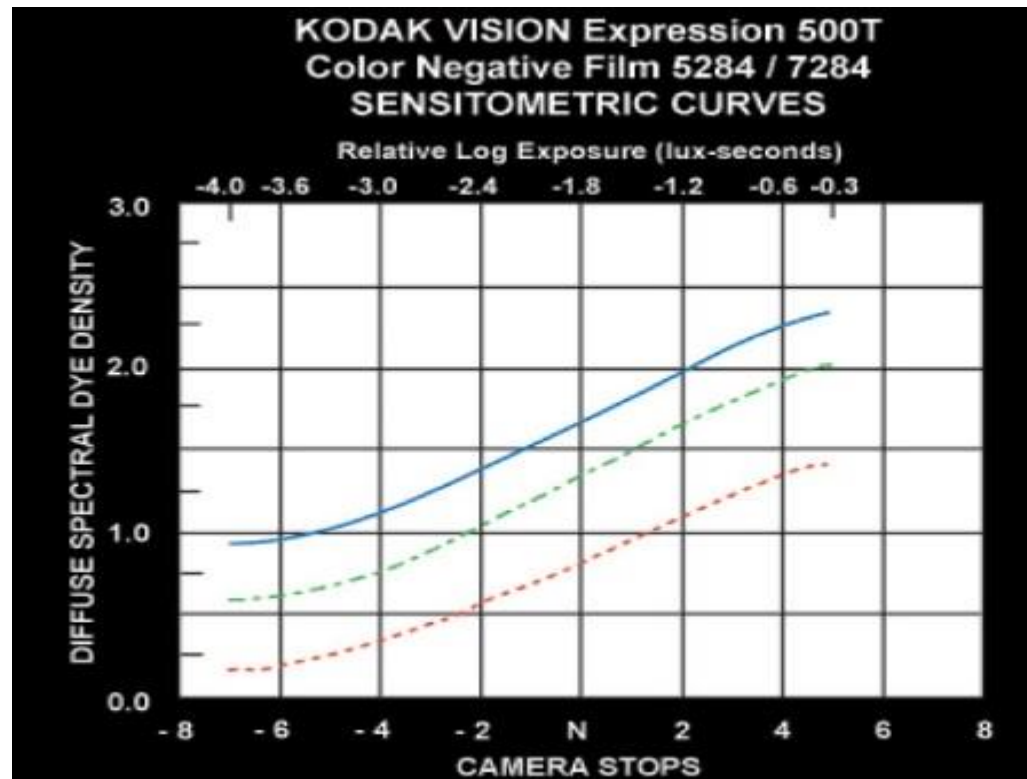


# 胶片电影对高光部分的处理

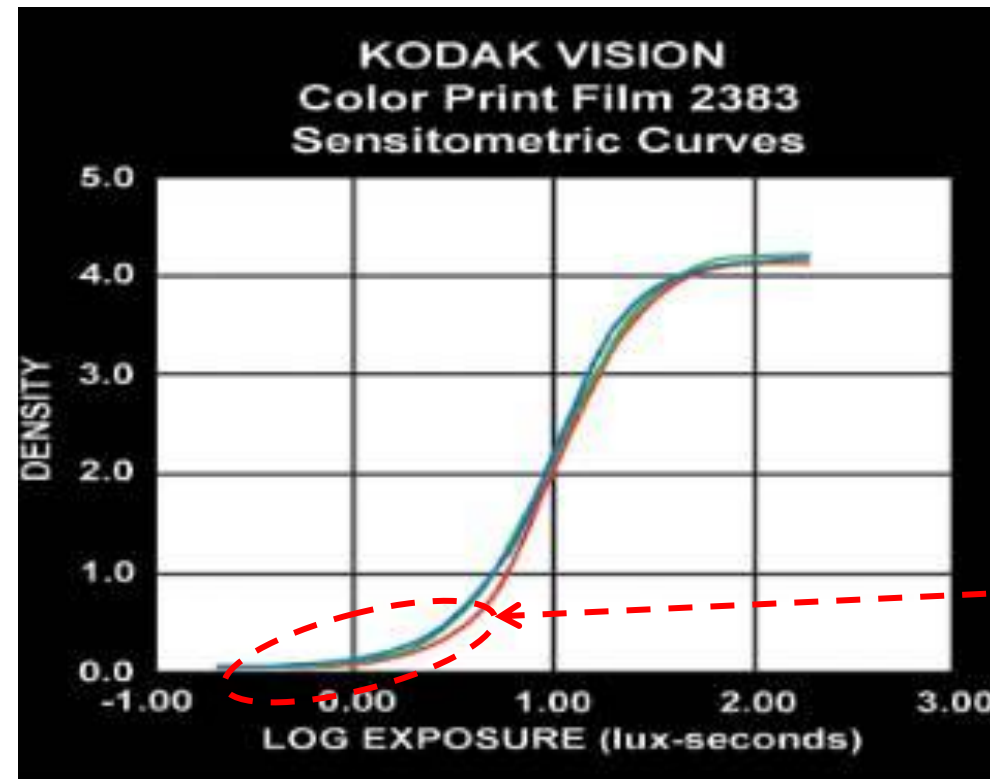
## □ 胶片密度曲线的肩部与趾部特性

- SDR电视用大部分电平和亮度资源再现人脸面部或拍摄对象主体，拐点给高亮度区域分配较少资源
- 胶片的肩部与趾部特性压缩了图像的暗部和高亮度区域
- 放映拷贝在高亮度区域对动态范围的压缩与摄像机的拐点处理几乎是一样的，但胶片电影是在放映拷贝上对高亮度区域进行了压缩，而电视是在拍摄时处理的

底片



放映拷贝



胶片密度越低  
放映亮度越高

高亮度区域动  
态范围被压缩

# 数字电视的可用电平范围

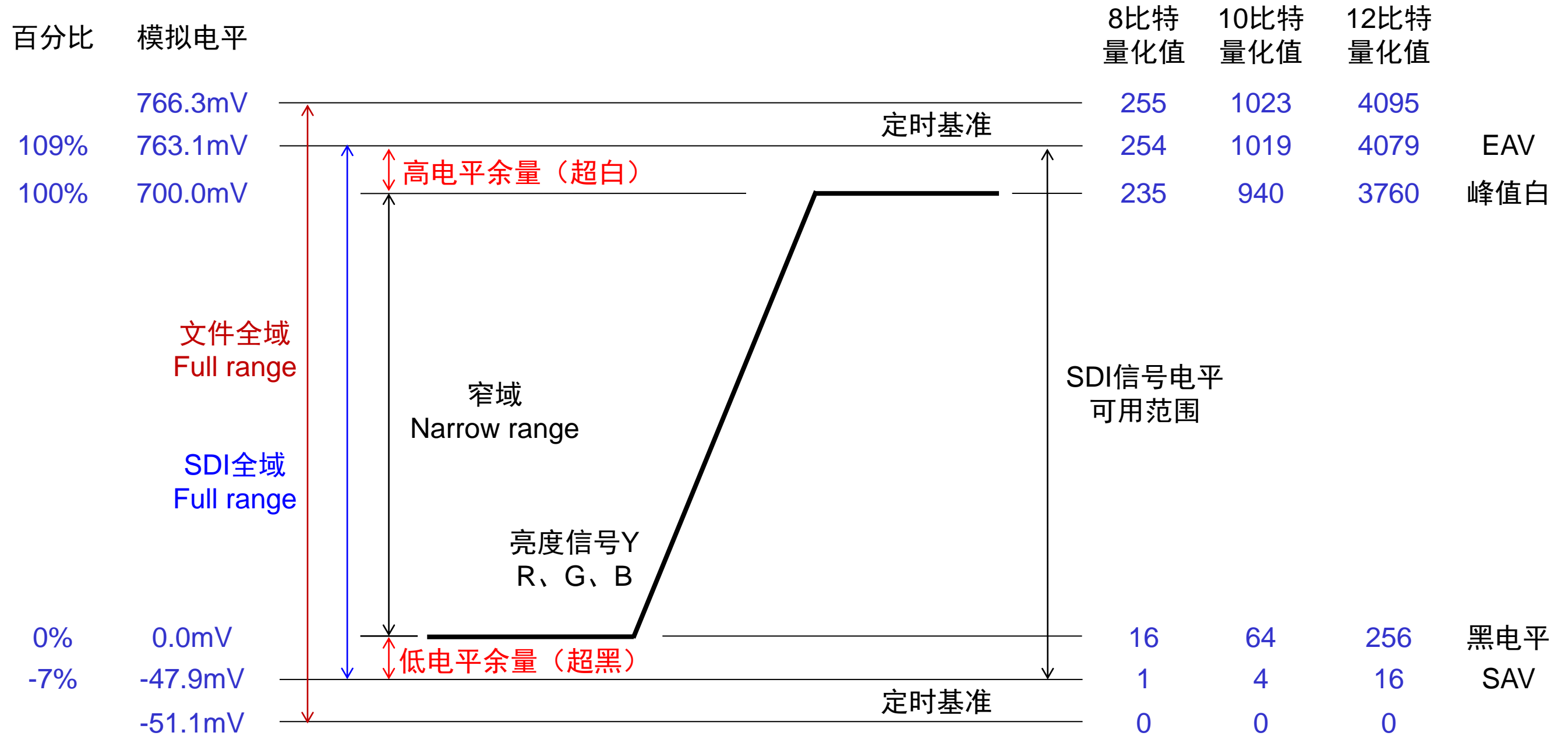
## □窄域（Narrow range）

- 电视技术从模拟过渡到数字后在很长时间内两种信号形态是并存的，因此必须考虑模拟与数字信号互转时的误差问题
- 电视行业制定技术标准时量化电平采用了窄域（Narrow range，或称为有限域Limited range），为用数字信息表达模拟电视信号电平保留了适当的余量
- 窄域为“比黑还黑”的超黑低电平预留了7%余量，为“比白还白”的超白高电平预留了9%余量，实际可用的电平范围是-7%至109%

## □窄域的最大可用电平为109%

- 数字传输不存在信号电平超限引起的电视发射机过载问题
- 随着模拟标清电视广播逐步关停，完全数字化的高清电视制作和播出不再禁止使用超黑与超白区域的电平资源
- 由于显示技术的发展，在监视器和电视机上高于100尼特的亮度资源也是可用的
- 因此，标清时代摄像机默认的拐点处理范围大约为90~100%，高清摄像机则提高到了98~109%，正常拍摄范围0~98%
- 如果不考虑拐点部分，现代SDR摄像机的伽玛特性与理论值几乎是一样的

# 量化值与电平的关系



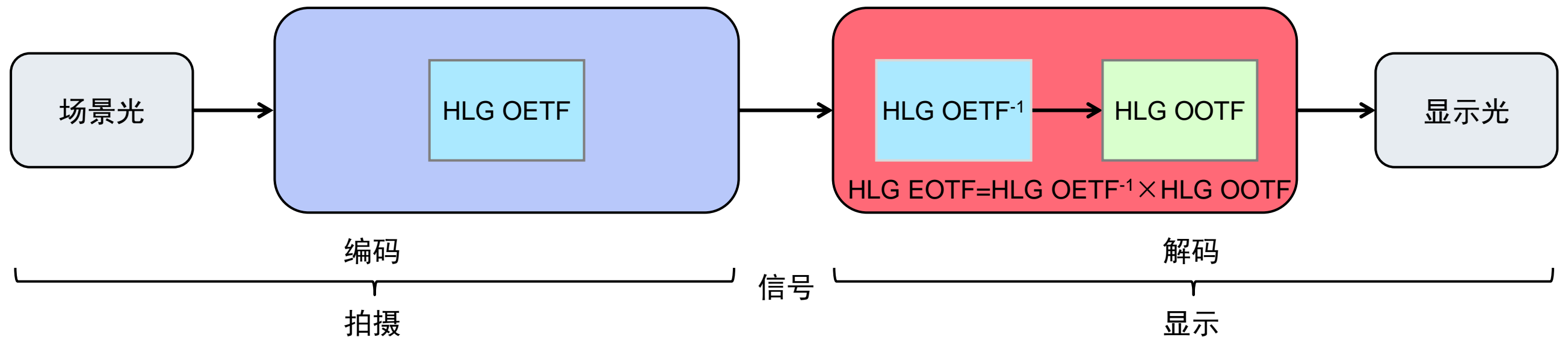
# 小结 – 电视伽玛（SDR）的演进

- 电视伽玛源自显像管的原生非线性EOTF，伽玛值2.2
- 为校正显像管的非线性，摄像机的OETF伽玛值设置为 $1/2.2 \approx 0.45$
- 为降低显像管表面反光的影响，BT.709对拍摄伽玛进行了修改
  - BT.709伽玛分为两段，实际伽玛值约为0.5，而不是0.45
- 为了使电视系统再现的图像比实际场景更漂亮，BT.1886把显示伽玛值定义为2.4
  - 拍摄与显示伽玛值分别修改后OOTF  $\approx 0.5 \times 2.4 = 1.2$
- 为扩展拍摄动态范围，在摄像机伽玛上加入了拐点
  - 加入拐点后拍摄动态范围从100%扩展至300-600%，但正常拍摄电平降低到了90%
- 数字电视允许使用超白电平资源
  - 使用超白电平后，正常拍摄电平提升至98%，接近100%
- 虽然看起来电视伽玛源自硬件（显像管）性能，但本质上来来自于幂函数

# ITU推荐的两种HDR伽玛

# HLG (Hybrid Log-Gamma, 混合对数伽玛)

- HLG是BBC和NHK提交的HDR伽玛，源自BBC白皮书WHP283、WHP 309，ARIB STD-B67
- HLG定义了拍摄端的光-电转换函数OETF
  - 因为HLG的OETF曲线是唯一的、不变的、与设备无关，有些文献把HLG称为场景参考 (Scene Referred)
  - BT.2100建议峰值显示亮度1000尼特时HLG的OOTF为1.2，峰值显示亮度变化时OOTF也随之改变，因此HLG的EOTF曲线是可变的，不是唯一的
  - HLG OETF是由分为不同区间的两个函数组成的
    - 50%电平以下是指数为0.5的幂函数，与SDR摄像机伽玛BT.709相近
    - 50%电平以上为对数函数，因此名为“混合对数伽玛”
- HLG与传统SDR电视都属于相对亮度体系
  - 显示亮度不但与信号电平有关，还与显示设备峰值亮度有关，信号的最高电平对应显示设备的最高亮度
- 与传统SDR电视一样，HLG量化电平采用窄域



# HLG OETF

□ 2016年7月发布的BT.2100-0中，HLG参考OETF公式

$$E' = \text{OETF}[E] = \begin{cases} \sqrt{E}/2 & 0 \leq E \leq 1 \\ a \cdot \ln(E - b) + c & 1 < E < 12 \end{cases}$$

■ 归一化范围 [0:12],  $a = 0.17883277$ ,  $b = 0.28466892$ ,  $c = 0.55991073$

□ 2017年6月发布的BT.2100-1中，HLG参考OETF公式

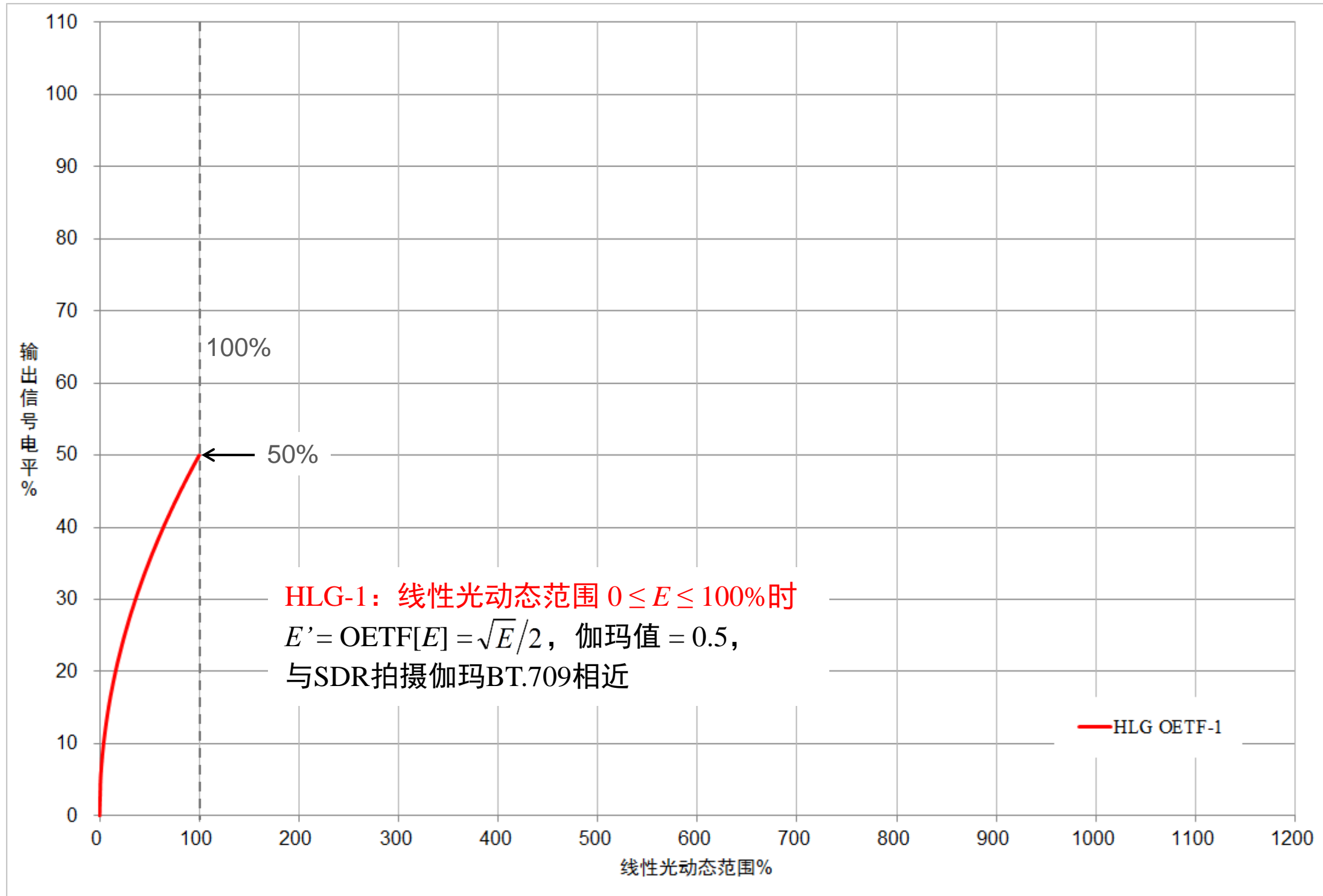
$$E' = \text{OETF}[E] = \begin{cases} \sqrt{3E} & 0 \leq E \leq 1/12 \\ a \cdot \ln(12E - b) + c & 1/12 < E \leq 1 \end{cases}$$

■ 归一化范围 [0:1],  $a = 0.17883277$ ,  $b = 1 - 4a$ ,  $c = 0.5 - a \cdot \ln(4a)$

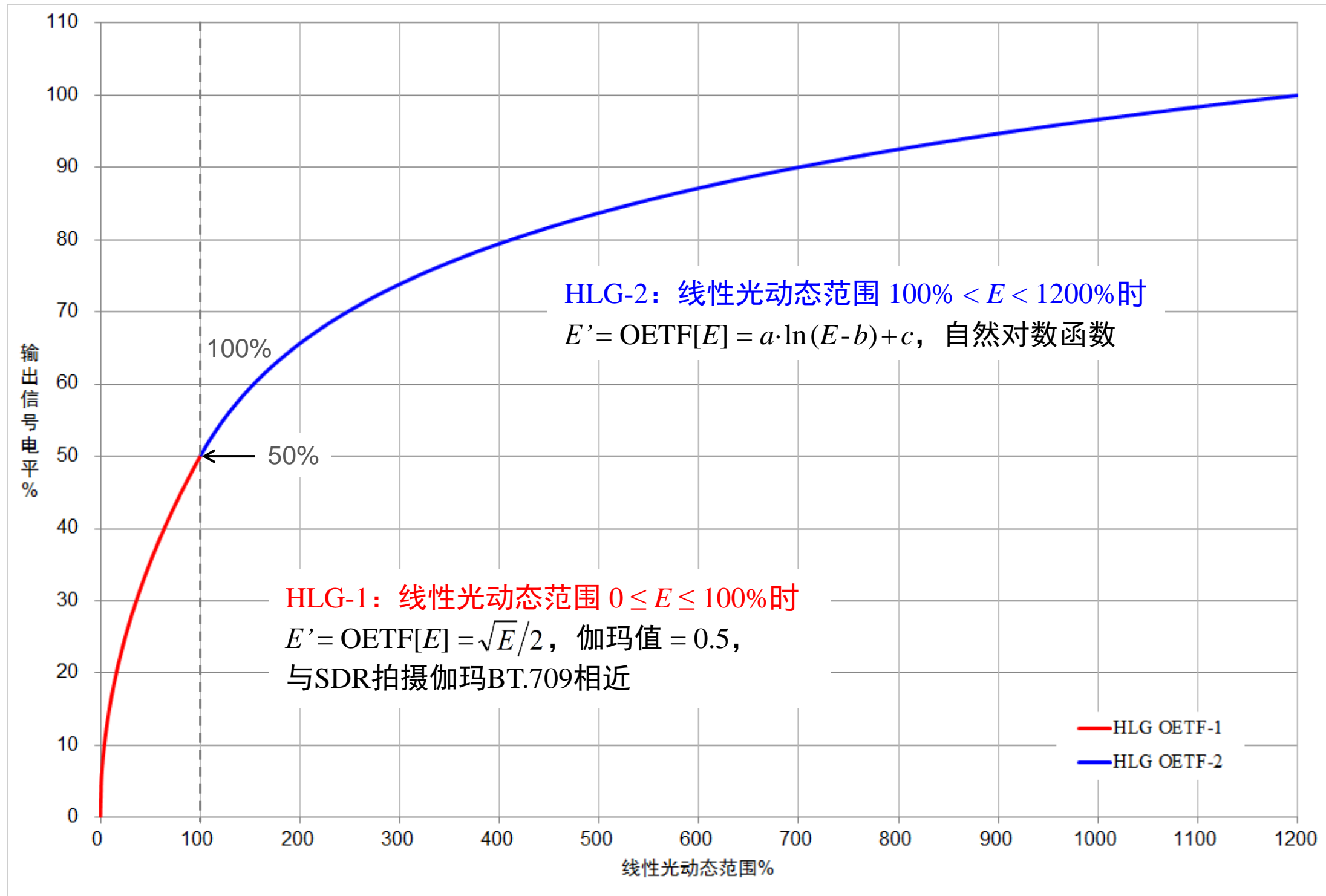
□ 两个公式是相同的，只是归一化范围不一样，在2017年的公式里数据范围归一化为1

□ 从2016年第一版BT.2100文件的HLG OETF公式中更容易看到其原始设计意图

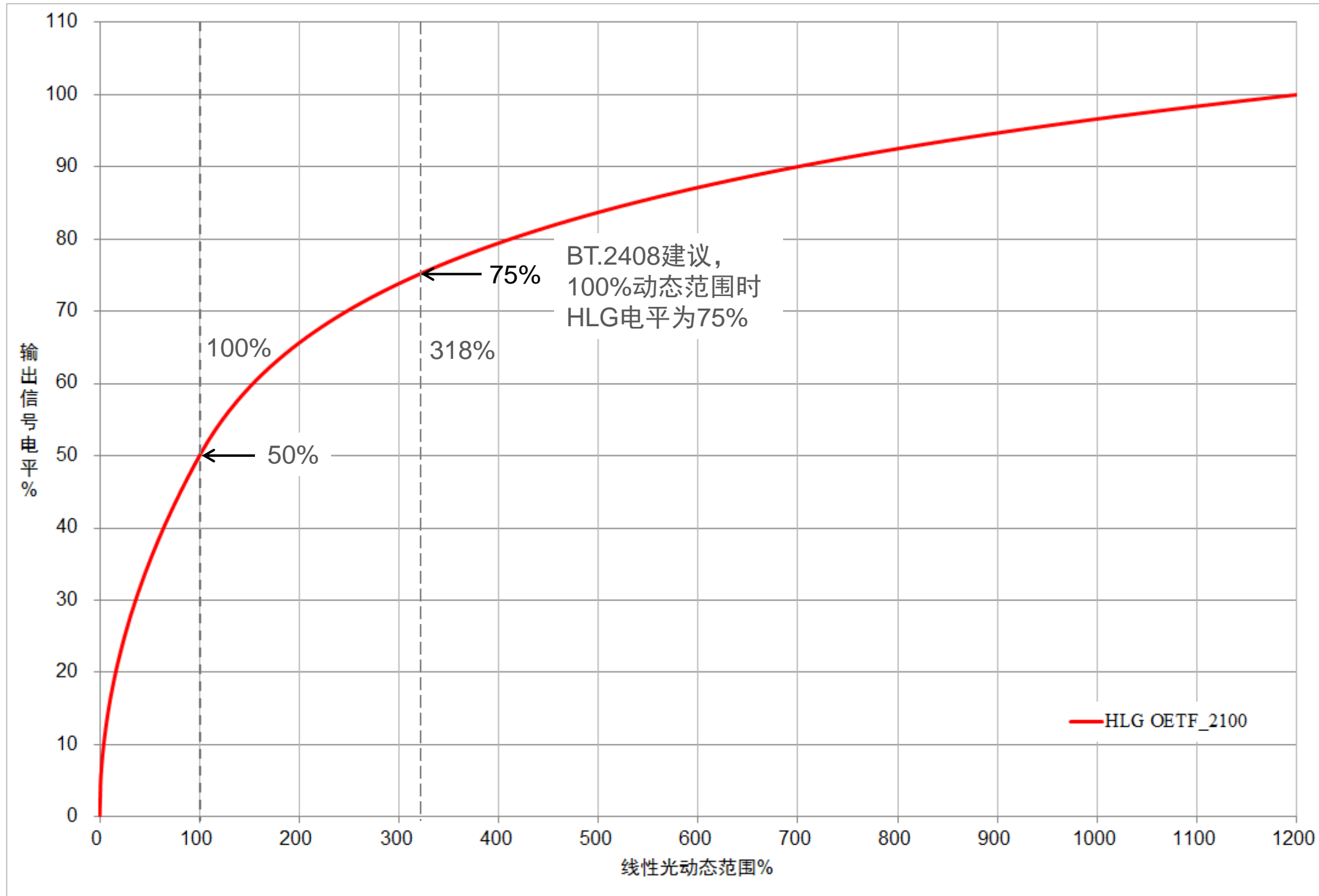
# HLG OETF



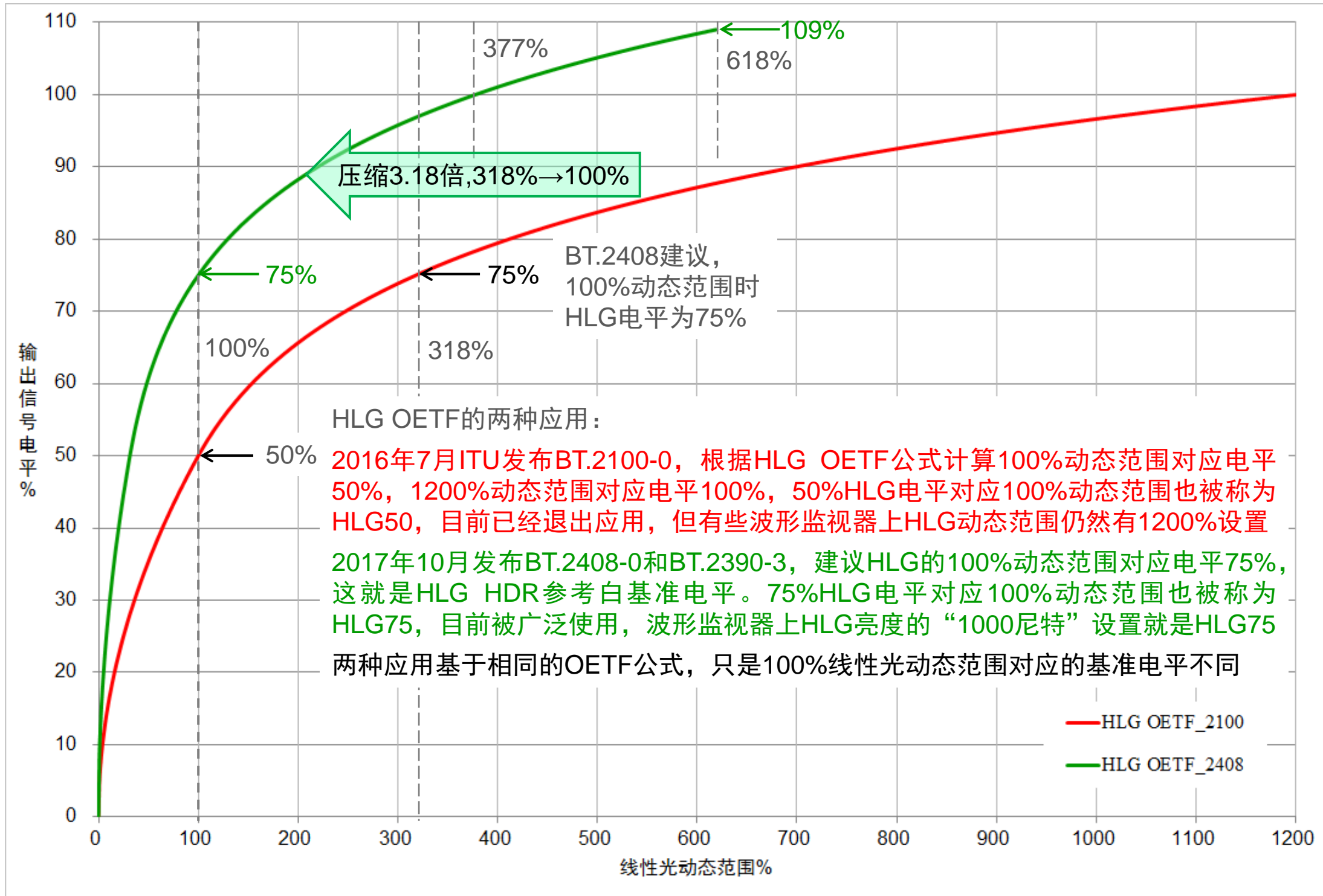
# HLG OETF



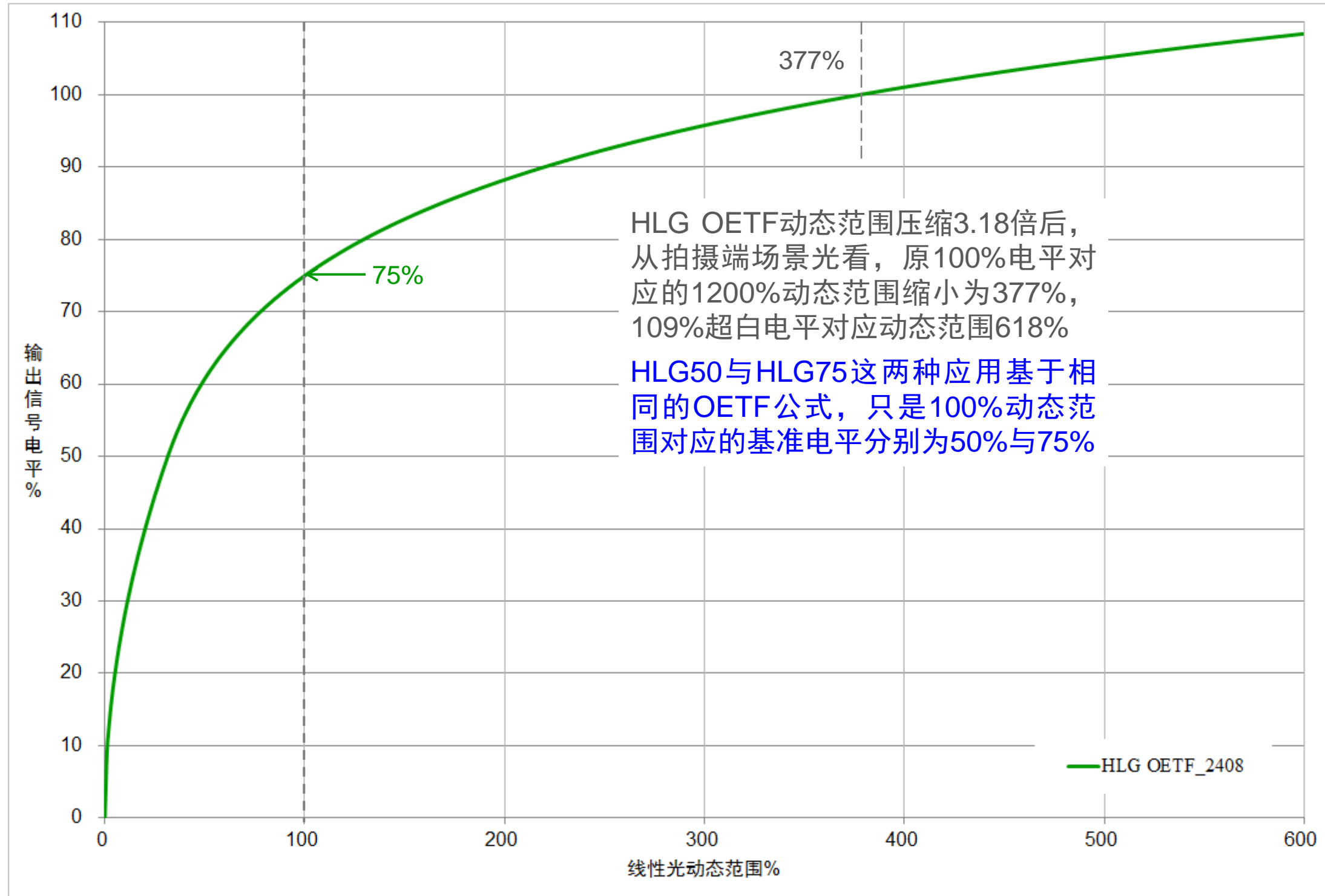
# HLG OETF



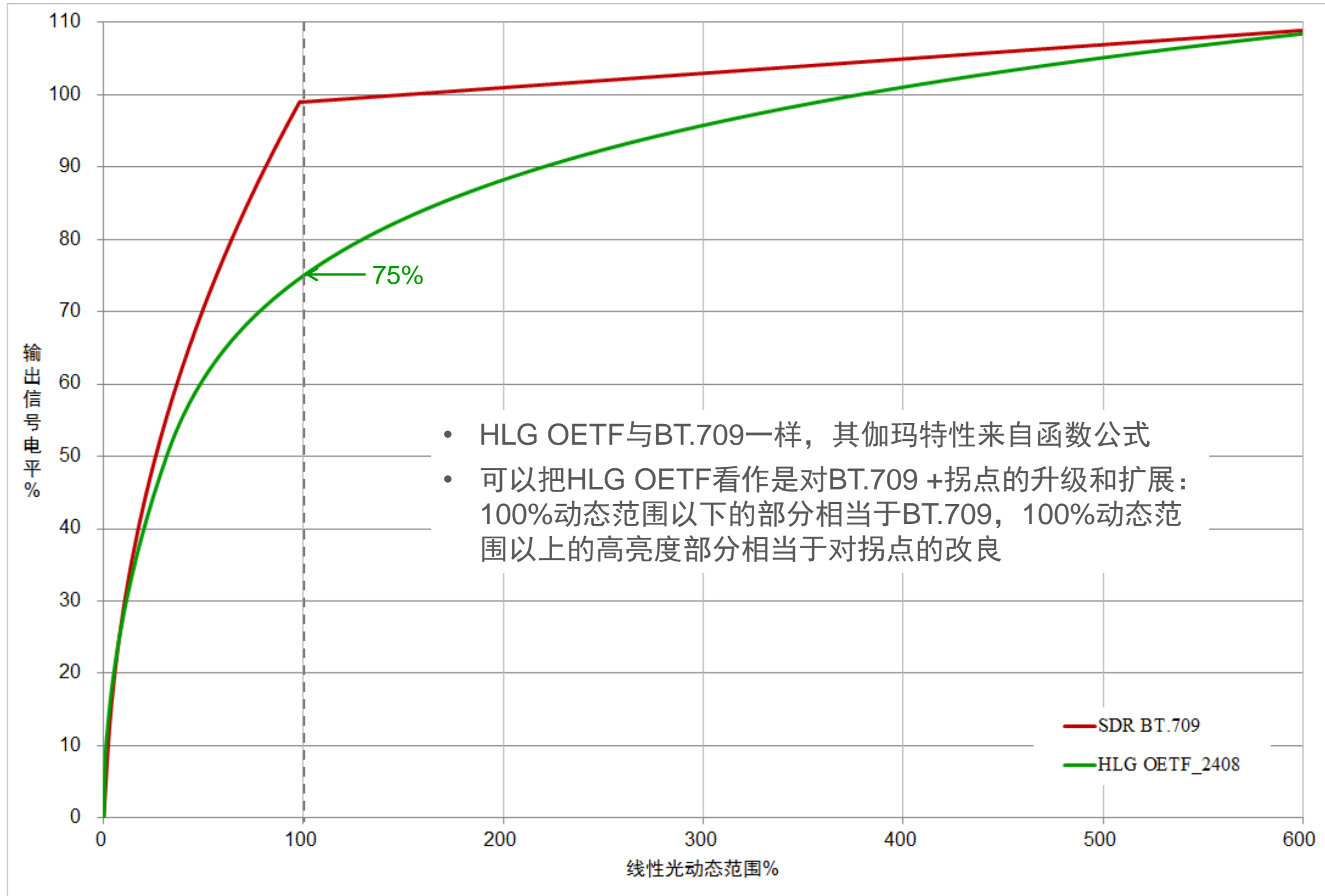
# HLG OETF



# HLG OETF (坐标动态范围调整为600%)



# SDR与HLG的OETF比较



# HLG OOTF和EOTF

□ 因为 $OOTF = OETF \times EOTF$ ，所以 $EOTF = OOTF \times OETF^{-1}$ ，根据BT.2100：

## ■ HLG参考OOTF

$$F_D = OOTF[E] = \alpha Y_S^{\gamma-1} E$$

$$R_D = \alpha Y_S^{\gamma-1} R_S$$

$$G_D = \alpha Y_S^{\gamma-1} G_S$$

$$B_D = \alpha Y_S^{\gamma-1} B_S$$

$$Y_S = 0.2627R_S + 0.6780G_S + 0.0593B_S$$

$\alpha$ ：显示设备峰值亮度

$\gamma = 1.2 + 0.42 \text{Log}_{10}(L_W/1000)$ ，显示亮度1000尼特时 $\gamma = 1.2$ ，400时1.03，2000时1.33

$F_D$ ：线性显示光亮度

$Y_S$ ：归一化的线性场景光亮度

## ■ HLG参考EOTF

$$E = OETF^{-1}[E'] = \begin{cases} E'^2 / 3 & 0 \leq E' \leq 1/2 \\ \{\exp((E' - c)/a) + b\} / 12 & 1/2 < E' \leq 1 \end{cases}$$

## ■ 在公式 $F_D = OOTF[E] = \alpha Y_S^{\gamma-1} E$ 中

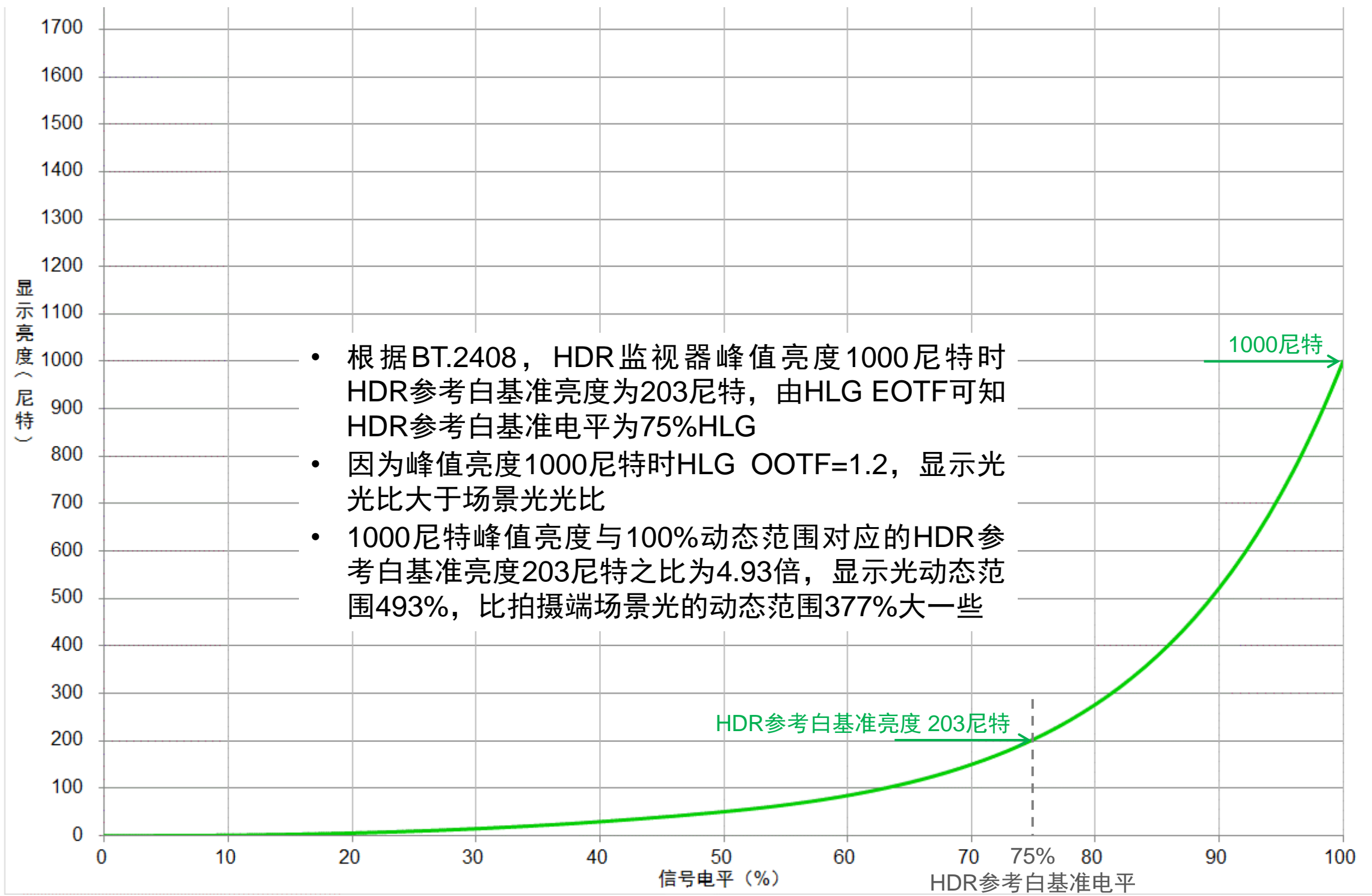
$E$ 是与线性场景光亮度对应的电信号，所以实际上 $Y_S = E$

因此 $F_D = OOTF[E] = \alpha E^{\gamma-1} E = \alpha E^{\gamma} E^{-1} E^1 = \alpha E^{\gamma}$

而显示亮度1000尼特时 $\gamma = 1.2$

所以1000尼特时HLG的OOTF就是可变伽玛值1.2

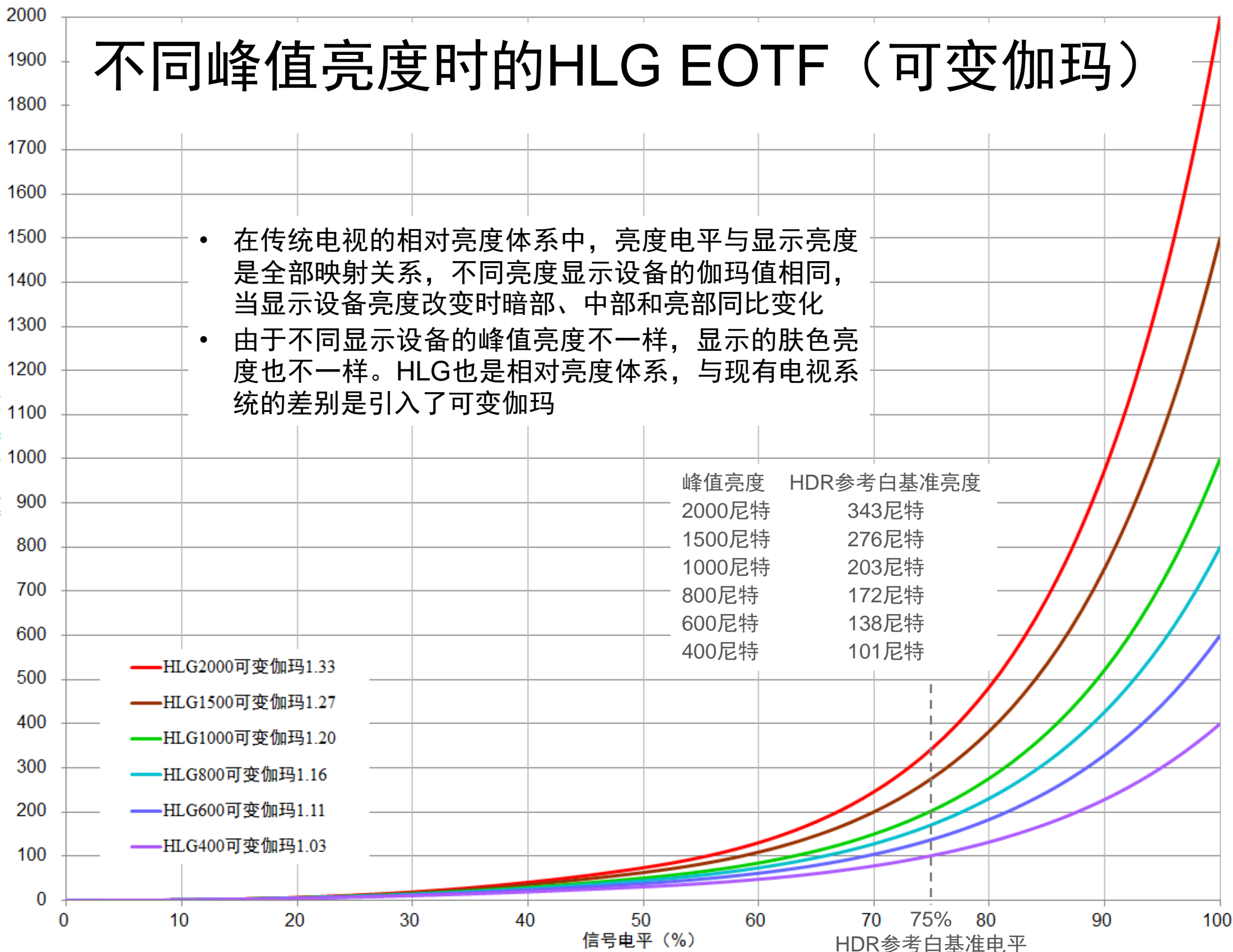
# HLG EOTF (1000尼特)



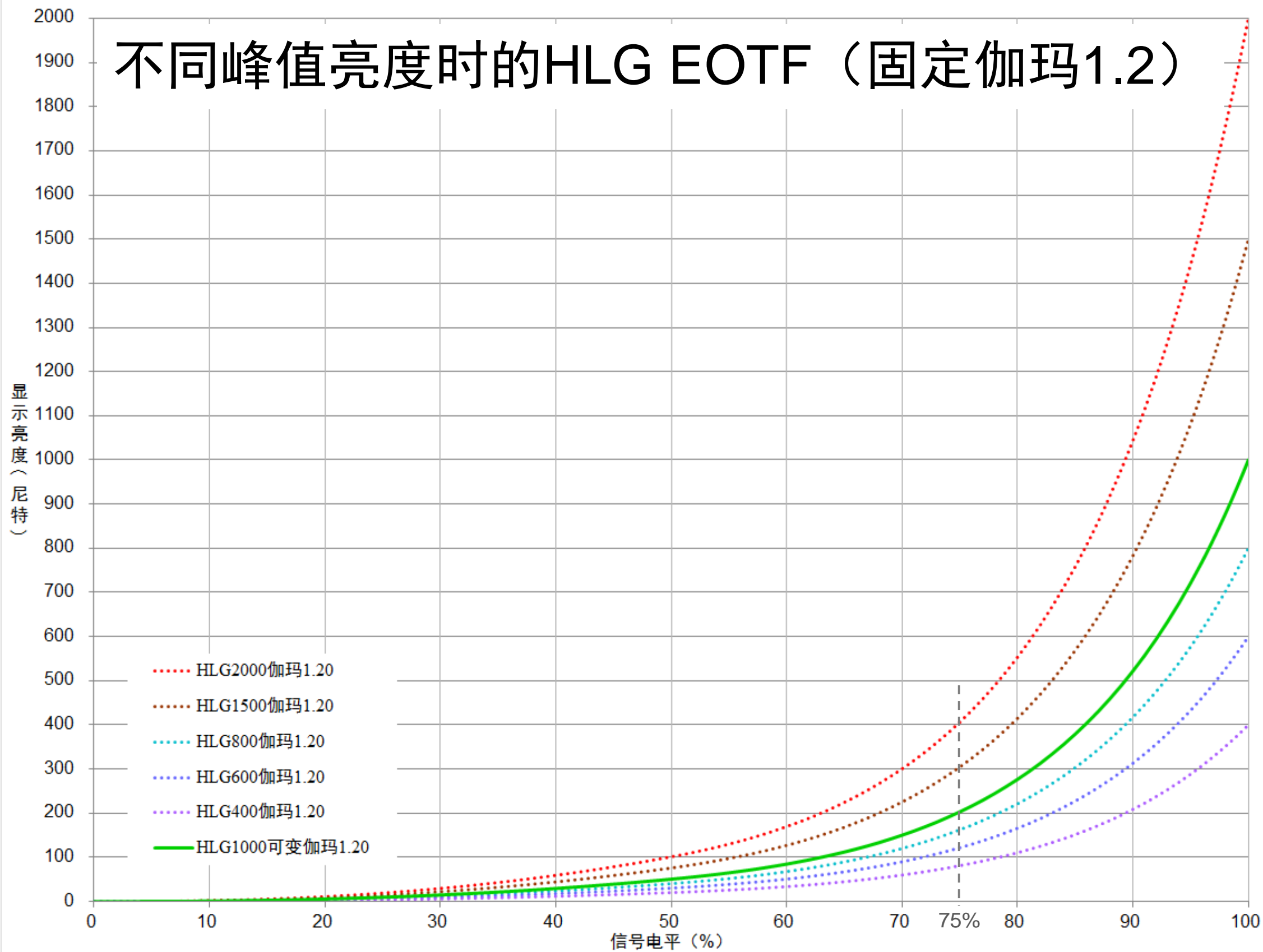
# 不同峰值亮度时的HLG EOTF (可变伽玛)

- 在传统电视的相对亮度体系中，亮度电平与显示亮度是全部映射关系，不同亮度显示设备的伽玛值相同，当显示设备亮度改变时暗部、中部和亮部同比变化
- 由于不同显示设备的峰值亮度不一样，显示的肤色亮度也不一样。HLG也是相对亮度体系，与现有电视系统的差别是引入了可变伽玛

显示亮度 (尼特)



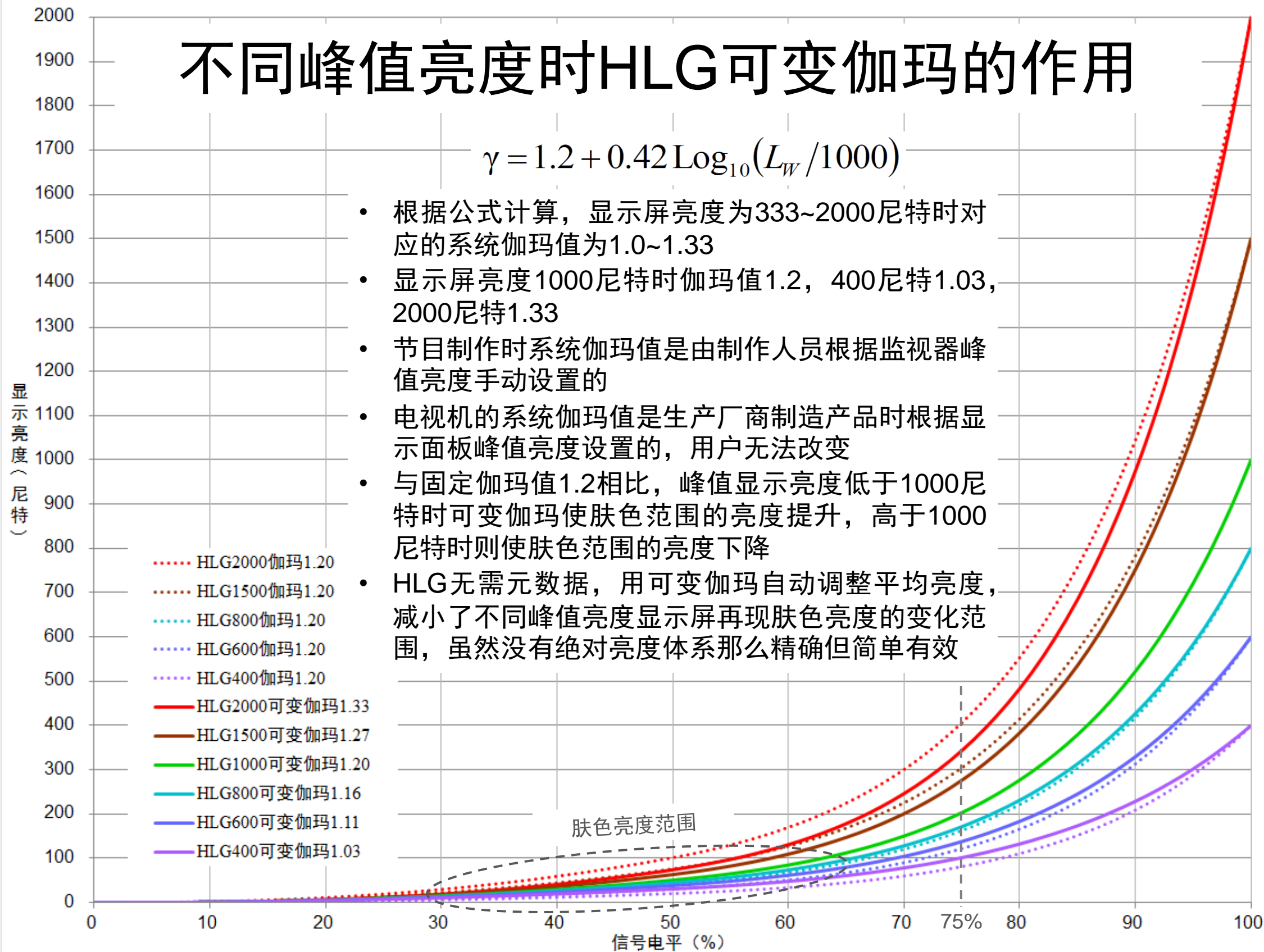
# 不同峰值亮度时的HLG EOTF (固定伽玛1.2)



# 不同峰值亮度时HLG可变伽玛的作用

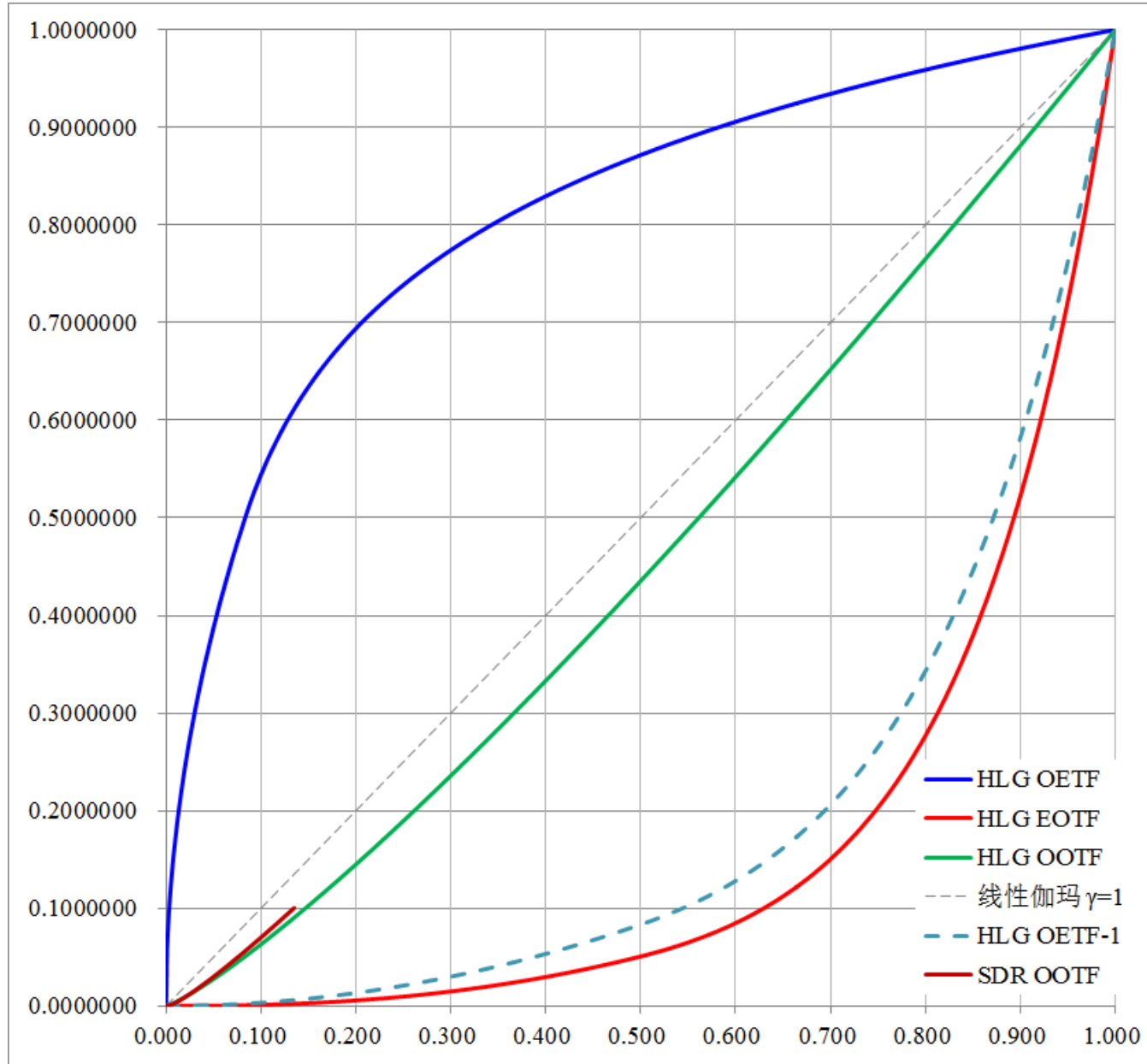
$$\gamma = 1.2 + 0.42 \text{Log}_{10}(L_w / 1000)$$

- 根据公式计算，显示屏亮度为333~2000尼特时对应的系统伽玛值为1.0~1.33
- 显示屏亮度1000尼特时伽玛值1.2，400尼特1.03，2000尼特1.33
- 节目制作时系统伽玛值是由制作人员根据监视器峰值亮度手动设置的
- 电视机的系统伽玛值是生产厂商制造产品时根据显示面板峰值亮度设置的，用户无法改变
- 与固定伽玛值1.2相比，峰值显示亮度低于1000尼特时可变伽玛使肤色范围的亮度提升，高于1000尼特时则使肤色范围的亮度下降
- HLG无需元数据，用可变伽玛自动调整平均亮度，减小了不同峰值亮度显示屏再现肤色亮度的变化范围，虽然没有绝对亮度体系那么精确但简单有效

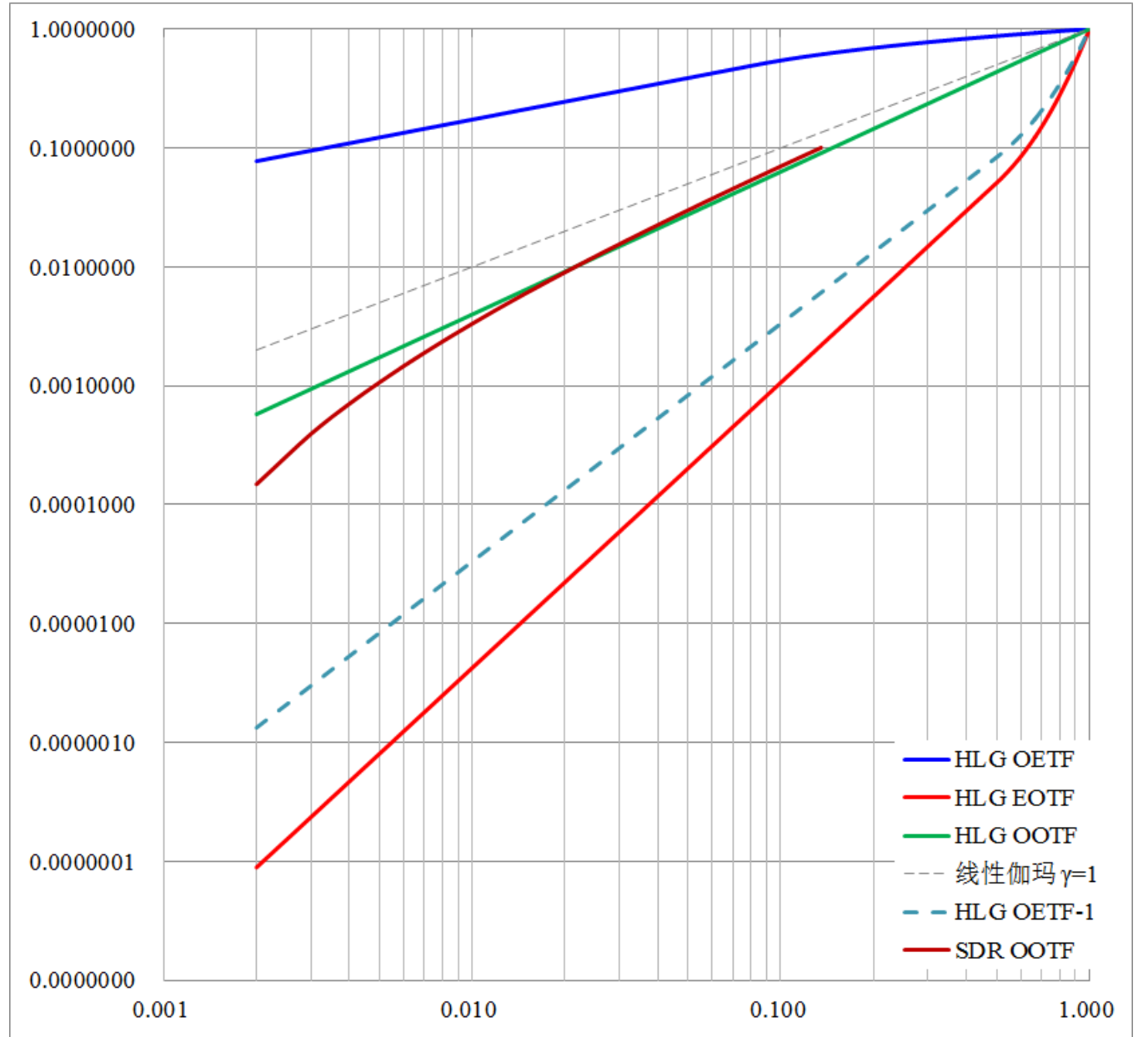


# 用对数坐标看HLG

- 峰值亮度1000尼特时HLG的OOTF为1.2
- 与SDR的OOTF相比HLG OOTF的暗部特性更平顺



HLG电视系统伽玛特性（线性坐标，归一化）



HLG电视系统伽玛特性（对数坐标，归一化）

# HLG小结

## □定义

- HLG定义了OETF，由OETF的反函数（ $OETF^{-1}$ ）和HLG的OOTF可求出EOTF，依据HDR参考白基准亮度和EOTF可得到HLG的HDR参考白基准电平，然后根据HDR参考白基准电平确定OETF的使用方法

## □HLG的OETF曲线是唯一的，不变的，但可以改变使用方法

- HDR制作初期100%动态范围对应50%HLG电平，目前对应75%HLG
  - 在BT.2408中75%HLG被称为“HDR参考白基准电平”
- 100%动态范围对应的电平从50%调整为75%后，HLG的拍摄动态范围从1200%降低为377%
- 实际制作时可根据需要以75%HLG为基准调整HDR参考白电平

## □HLG的EOTF曲线不是唯一的

- 峰值亮度不同时显示设备具有不同的EOTF曲线
  - 峰值亮度1000尼特时HDR参考白基准电平（75%HLG）对应显示亮度203尼特

## □可变伽玛的作用

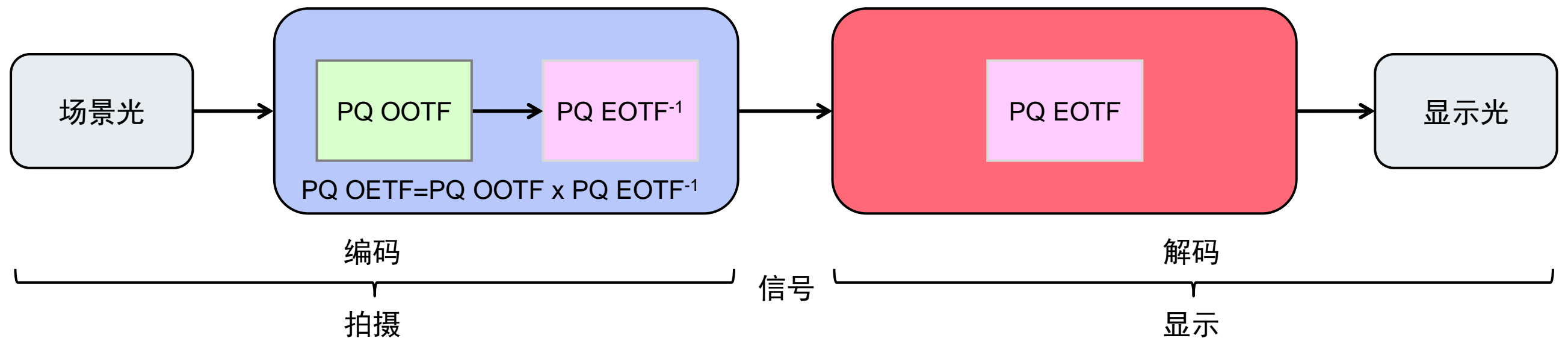
- HLG的系统伽玛随峰值亮度变化，显示亮度越高伽玛值越大： $\gamma = 1.2 + 0.42 \text{Log}_{10}(L_w/1000)$
- 采用可变伽玛的目的是减小不同峰值亮度显示设备再现肤色亮度的变化范围
- HLG的OOTF曲线不是唯一的，实际上可变伽玛的值就是OOTF
  - 峰值亮度1000尼特时HLG OOTF=1.2

## □HLG与SDR一样，其伽玛特性来自函数公式

## □与SDR相比，可以认为HLG是对传统电视的“改良（Evolution）”

# PQ (Perceptual Quantization, 感知量化)

- PQ是Dolby提交的HDR伽玛，源自SMPTE ST2084
- PQ定义了显示设备的电-光转换函数EOTF
  - 因为PQ的EOTF曲线是唯一的、不变的、与设备无关，有些文献把PQ称为显示参考 (Display Referred)
  - BT.2100推荐了PQ的OOTF，但OOTF是可以根据需要改变的，因此OETF是可变的，不是唯一的
- EOTF
  - PQ EOTF来自对人眼视觉灵敏度的测试，而不是直接引用幂函数或对数函数
    - 经过精密测试得到人眼灵敏度曲线后，Dolby制作了一个能完美模拟该曲线的函数，这就是参考PQ EOTF公式
- PQ属于绝对亮度体系
  - 显示亮度只与信号电平有关，与设备无关，信号电平与显示亮度呈现一一对应的关系
  - 100%电平对应最高峰值亮度10000尼特
  - 在显示设备的能力范围内，相同信号电平在不同峰值亮度设备上呈现相同的亮度
- PQ量化电平既可以用窄域，也可以用全域



# PQ EOTF

## □ 杜比搭建的超高亮度、超高对比度显示测试系统

### ■ 用高亮度数字电影放映机在小屏幕上实现了

- 最高亮度：20,000尼特
- 最低亮度：0.004尼特
- 对比度：5,000,000:1
- 色域：DCI-P3

### ■ 用该系统测试获得了人眼灵敏度曲线

## □ 用参考PQ EOTF完美模拟了人眼灵敏度曲线

$$F_D = \text{EOTF}[E'] = 10000 Y$$

$$Y = \left( \frac{\max\left[(E'^{1/m_2} - c_1), 0\right]}{c_2 - c_3 E'^{1/m_2}} \right)^{1/m_1}$$

$$m_1 = 2610/16384 = 0.1593017578125$$

$$m_2 = 2523/4096 \times 128 = 78.84375$$

$$c_1 = 3424/4096 = 0.8359375 = c_3 - c_2 + 1$$

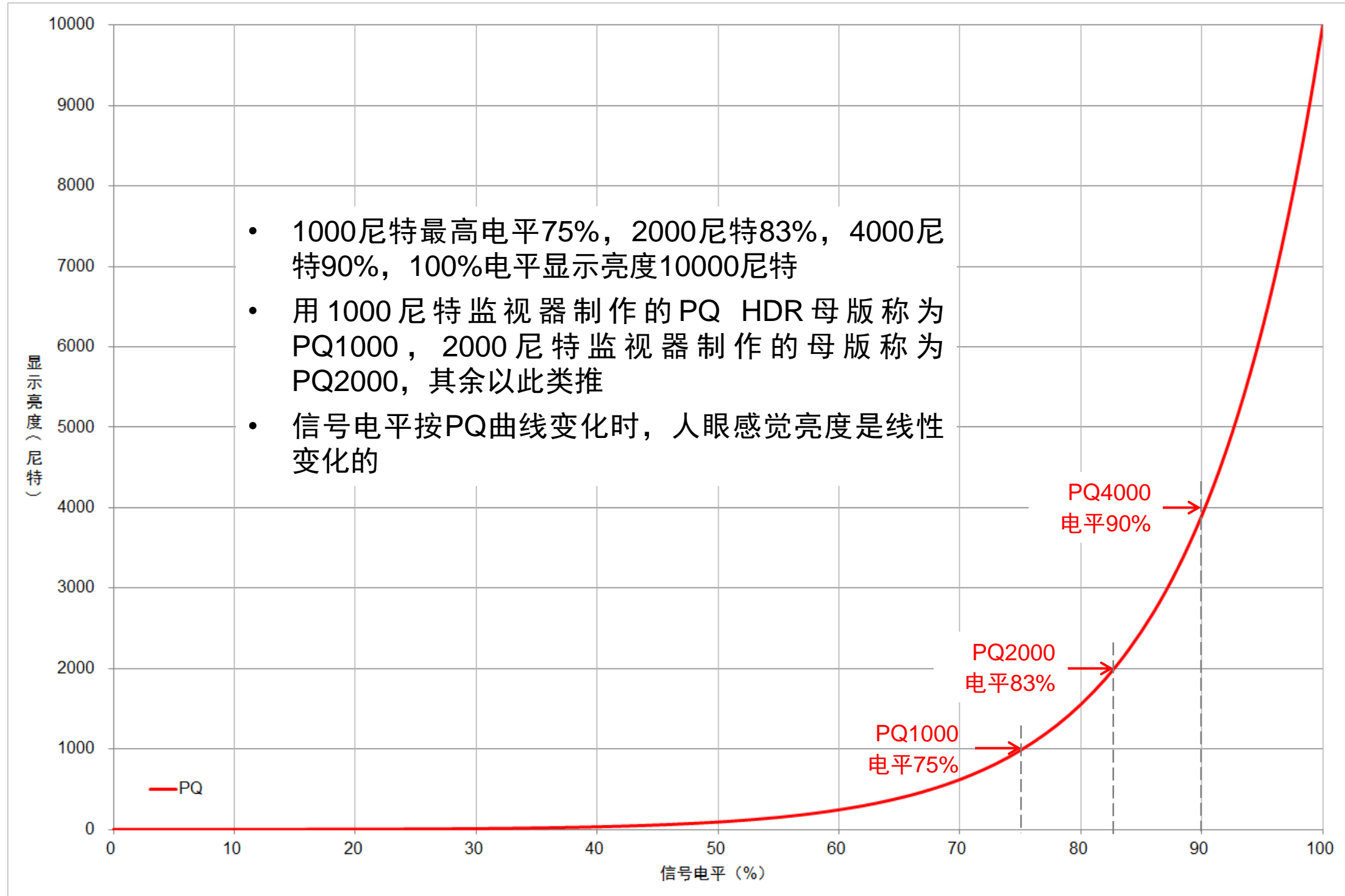
$$c_2 = 2413/4096 \times 32 = 18.8515625$$

$$c_3 = 2392/4096 \times 32 = 18.6875$$

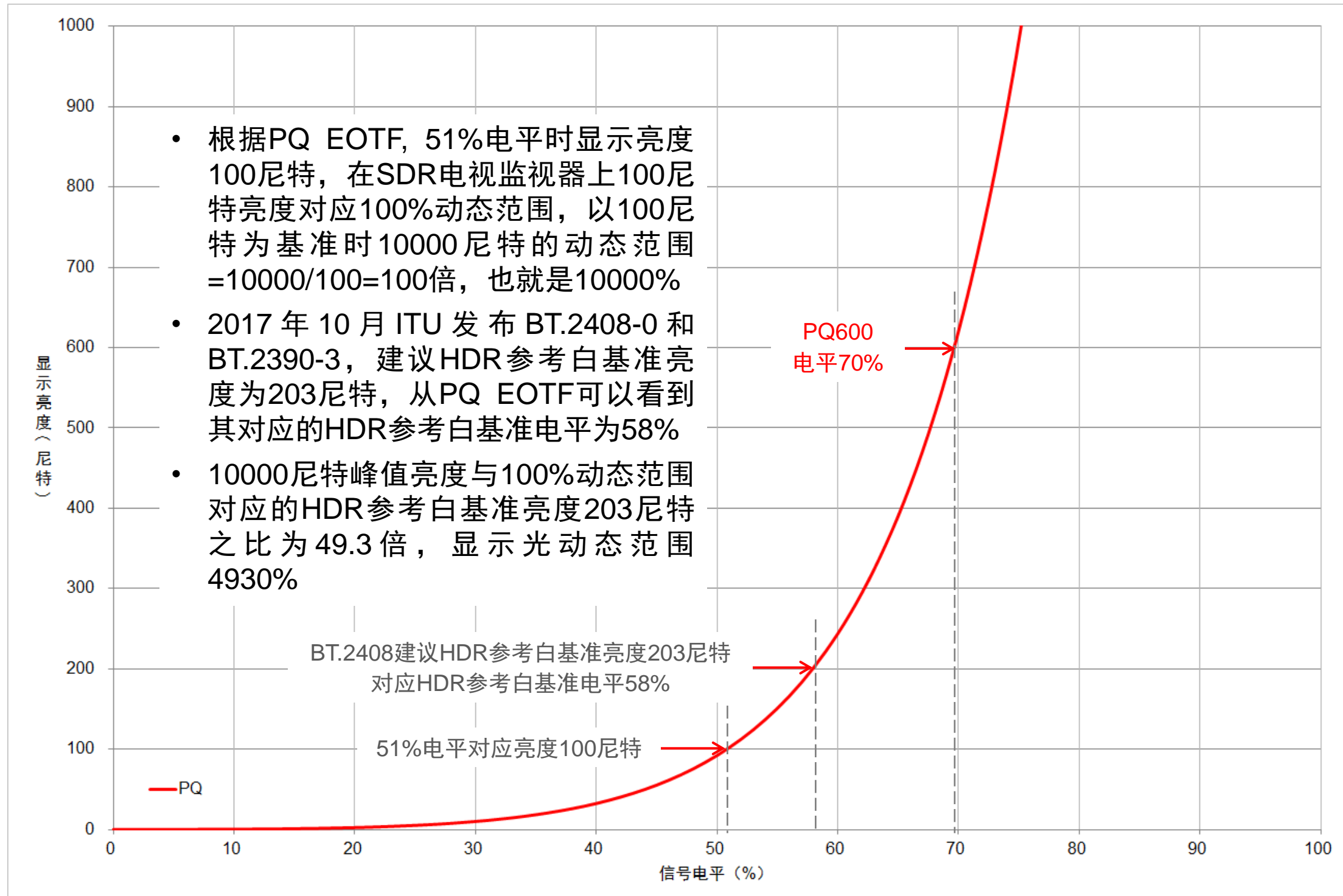
$E'$ : [0,1]区间内的非线性彩色值,  $F_D$ : 显示的线性光亮度



# 完整的PQ EOTF (10000尼特)



# PQ EOTF (1000尼特)



# PQ OOTF

□ 为了与SDR电视保持相同的观感，ITU建议PQ与SDR的OOTF一致

■ 根据BT.2100和BT.2390，需要把 $OETF_{709}$ 和 $EOTF_{1886}$ 的亮度扩展到PQ HDR范围

➤ SDR峰值显示亮度100尼特，PQ10000尼特，扩展系数为100

➤ 因为 $SDR\ OOTF = OETF_{709} \times EOTF_{1886} \approx 1.2$ ，把100尼特扩展100倍时场景光并不需要扩展100倍

需要扩展的倍数为： $100^{1/SDR\ OOTF} = 59.5208$  倍

■ 为了把 $OETF_{709}$ 扩展到 $G_{709}$ 的HDR范围，将HDR的 $E$ 归一化为0到1的范围内：

$$F_D = OOTF[E] = G_{1886} [G_{709} [E]] = G_{1886} E'$$

$$E' = G_{709} [E] = \begin{cases} 1.099 (59.5208E)^{0.45} - 0.099 & \text{for } 1 > E > 0.018 / 59.5208 \\ 4.5 (59.5208E) & \text{for } 0.018 / 59.5208 \geq E > 0 \end{cases}$$

■ 因为 $100^{1/2.4} = 6.813$ ，所以 $6.813^{2.4} = 100$ ，要把 $EOTF_{1886}$ 的范围扩展到HDR的 $G_{1886}$ ，只需把 $EOTF_{1886}$ 的区间从1扩展到6.813，亮度就从100增加到10000尼特：

$$F_D = G_{1886} [E'] = 100 E'^{2.4}$$

■ 依据上式， $E=1$ 时亮度为10000尼特， $E=1/59.5208$ 时亮度为100尼特，在包括SDR的整个HDR区间内PQ与SDR的OOTF一致

# PQ OETF

□ 因为 $OETF = OETF \times EOTF$ ，所以 $OETF = OETF \times EOTF^{-1}$ ，根据BT.2100

■ 参考PQ OETF为

$$E' = OETF[E] = EOTF^{-1}[OOTF[E]] = EOTF^{-1}[F_D]$$

式中

$$EOTF^{-1}[F_D] = \left( \frac{c_1 + c_2 Y^{m_1}}{1 + c_3 Y^{m_1}} \right)^{m_2}$$

$$Y = F_D / 10000$$

$E', F_D, E, m_1, m_2, c_1, c_2, c_3$ : 与PQ EOTF公式中的定义相同

□ 实际上几乎所有PQ节目都是调色制作的

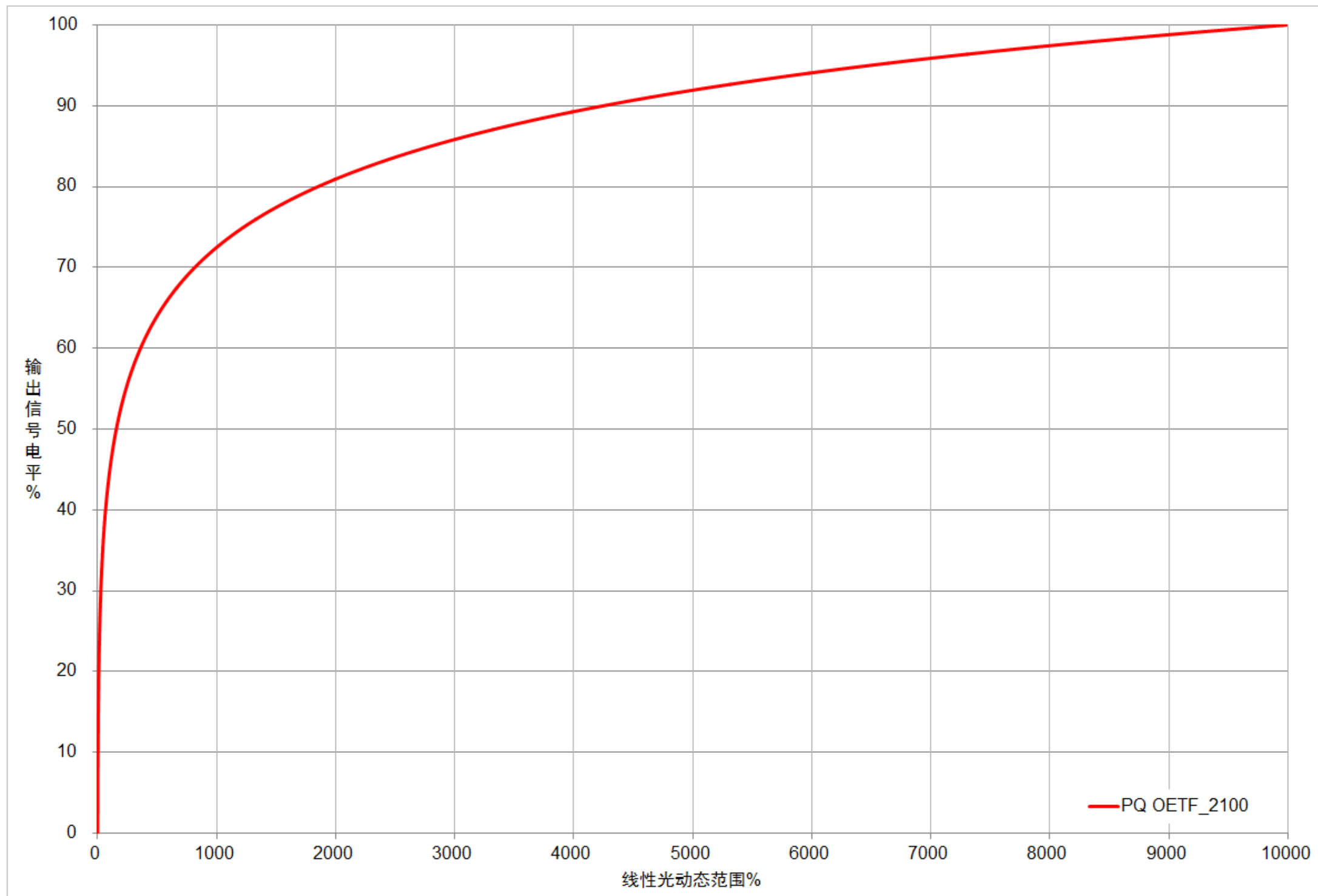
■ 与直播不同，调色制作时并不需要OETF，只需要监视器的EOTF

■ 所见即所得的直播制作需要明确定义OETF，不过目前用PQ直播的可能性并不高

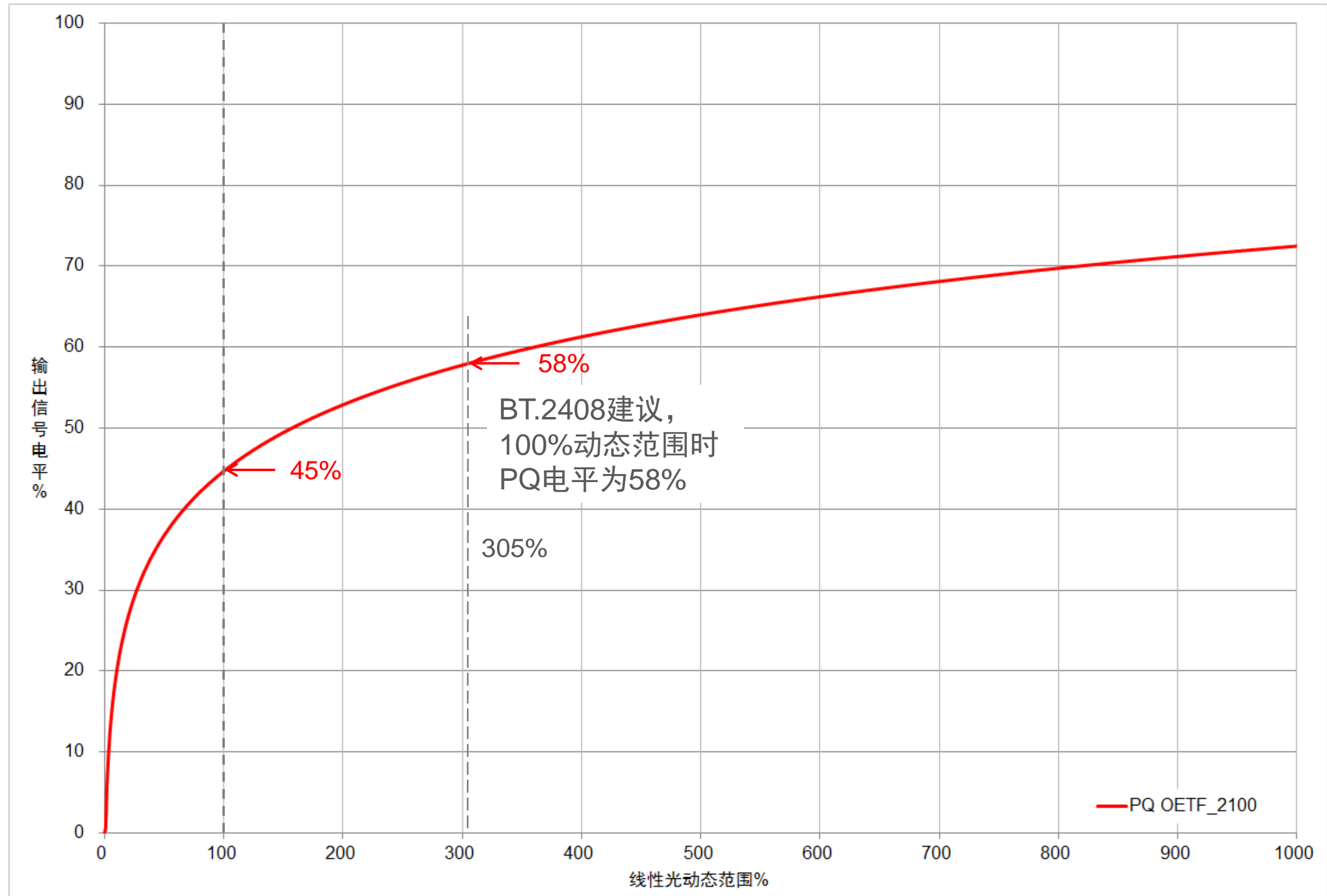
■ PQ与电影行业的DCI显示伽玛相似

- 在电影的所见非所得流程中，影像的最终色调不是拍摄时确定的，而是导演和调色师在调色时确定的，因此DCI只定义了显示伽玛EOTF，无需定义拍摄伽玛OETF

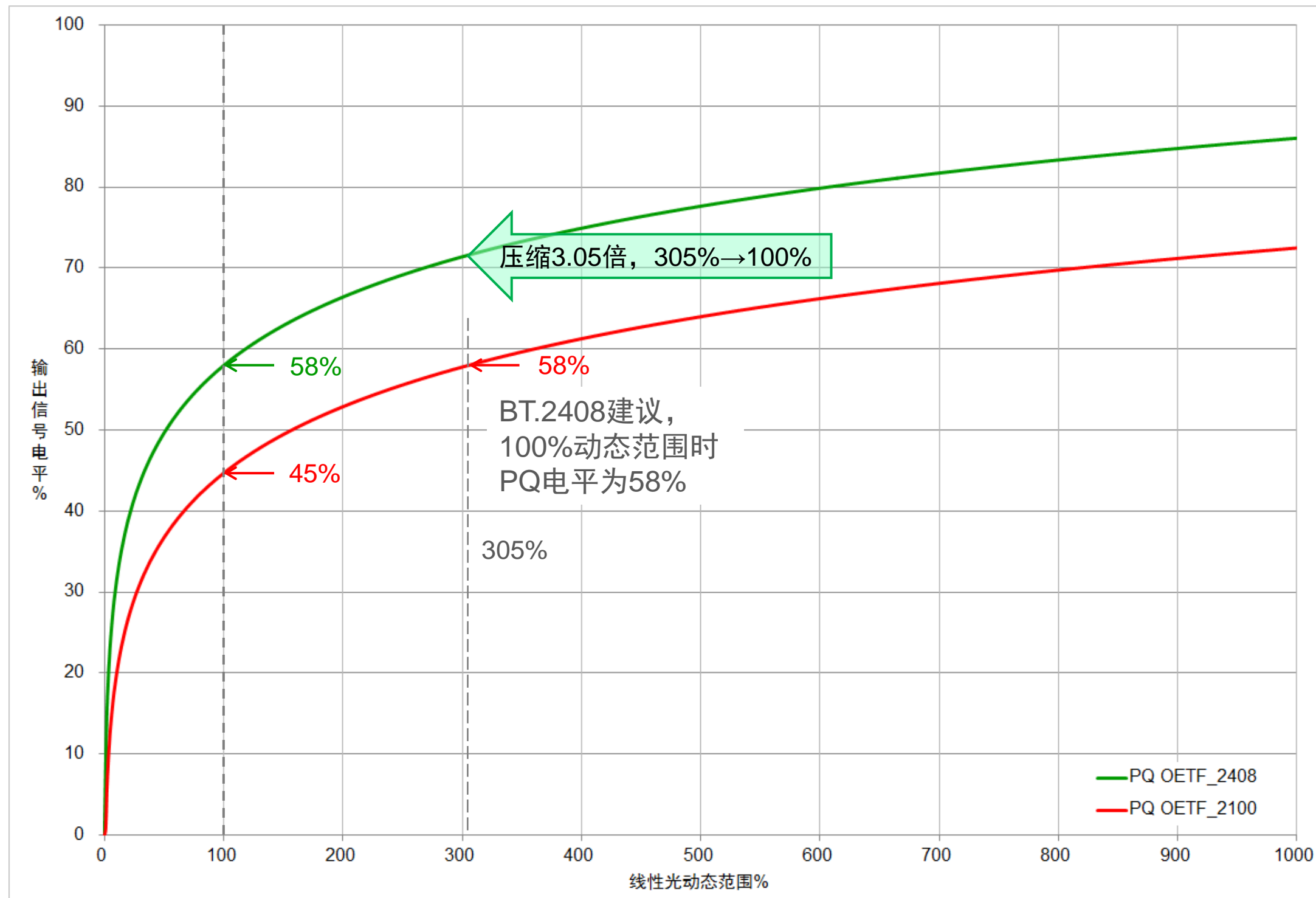
# 完整的PQ OETF (10000%动态范围)



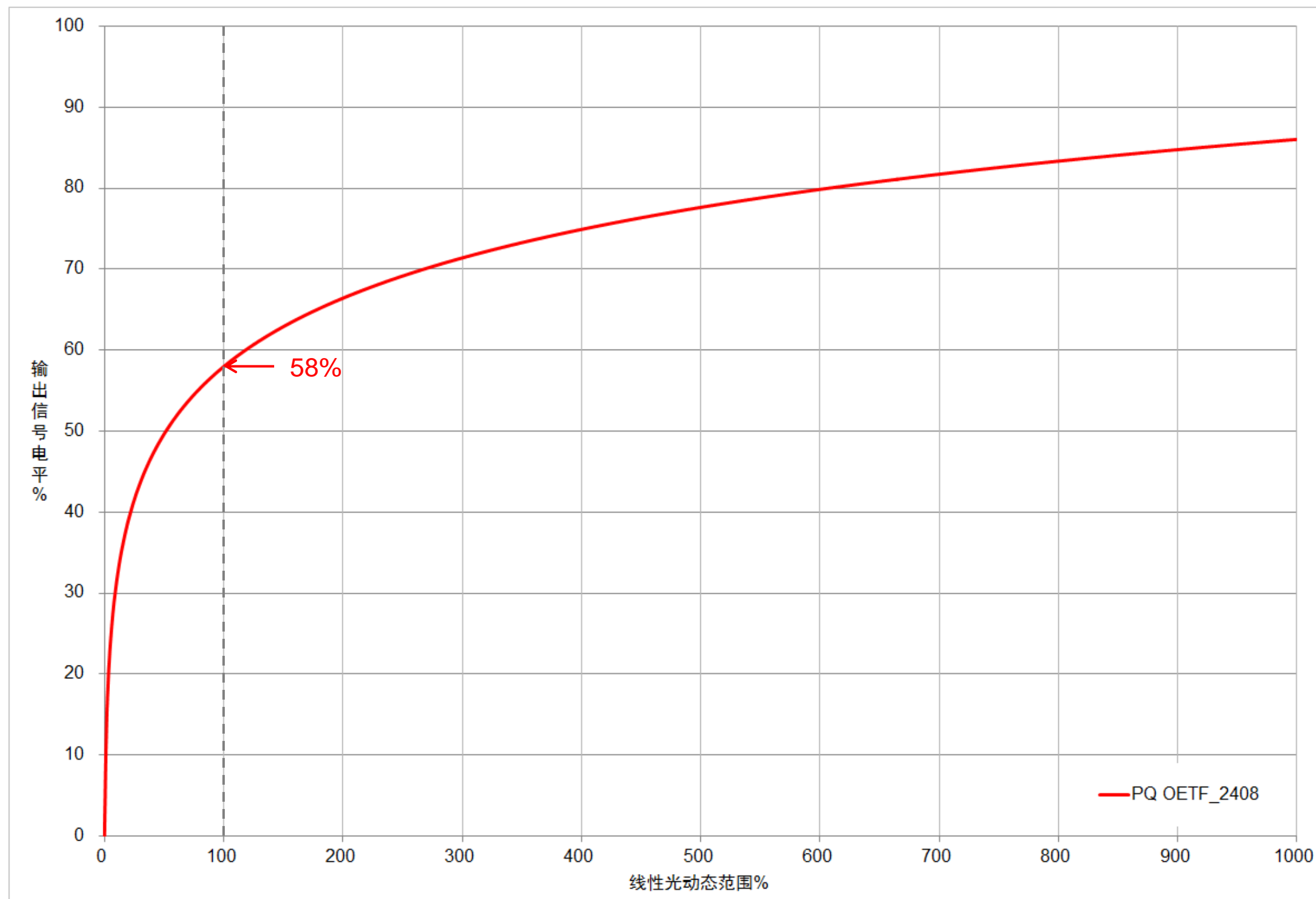
# PQ OETF (1000%动态范围)



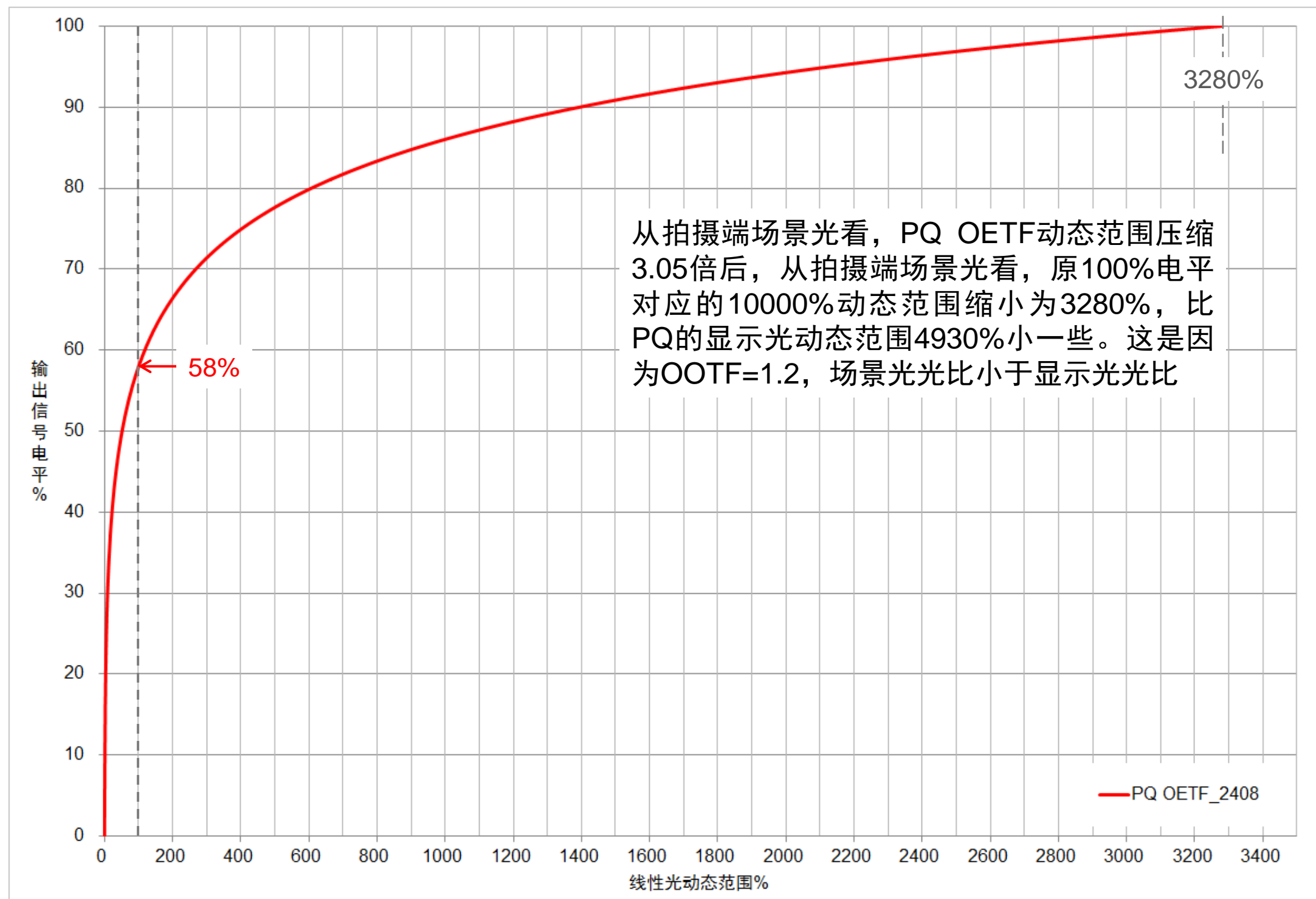
# PQ OETF (1000%动态范围)



# 实际使用的PQ OETF (1000%动态范围)



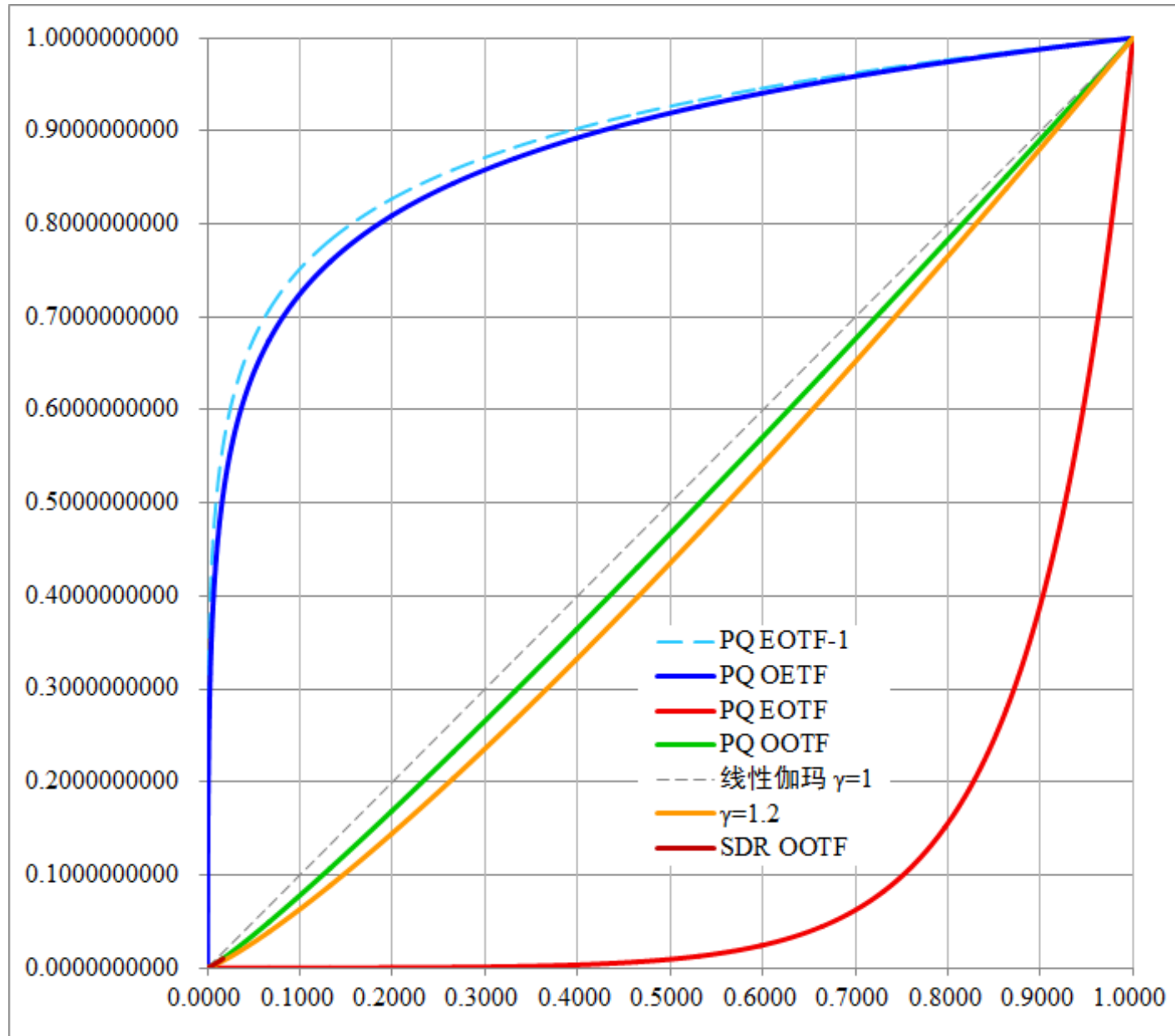
# 完整的PQ OETF曲线（3280%动态范围）



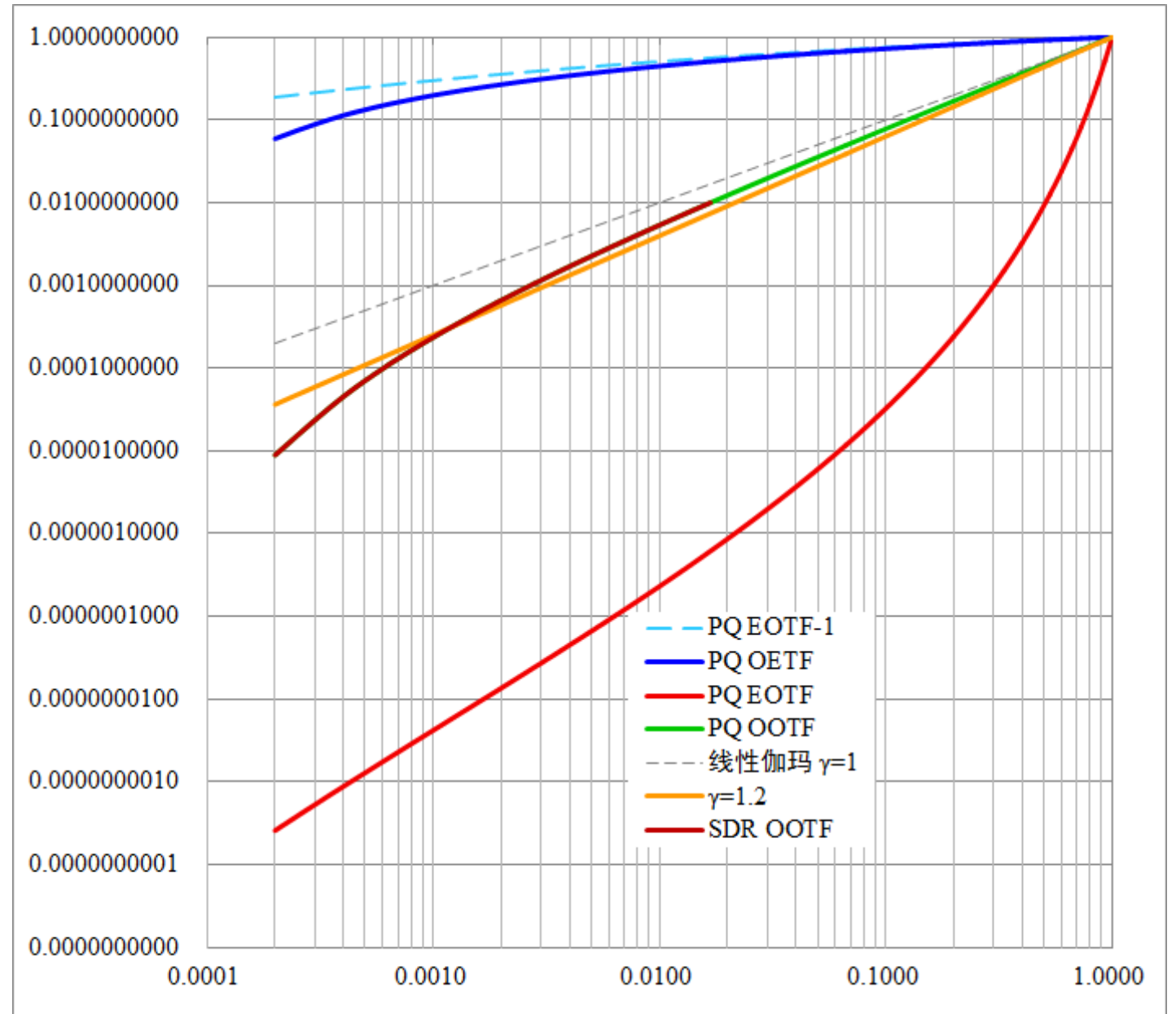
# 用对数坐标看PQ

□ PQ的OOTF是SDR OOTF的扩展

□ 从PQ的EOTF可以看到，人眼的灵敏度并不完全是对数特性



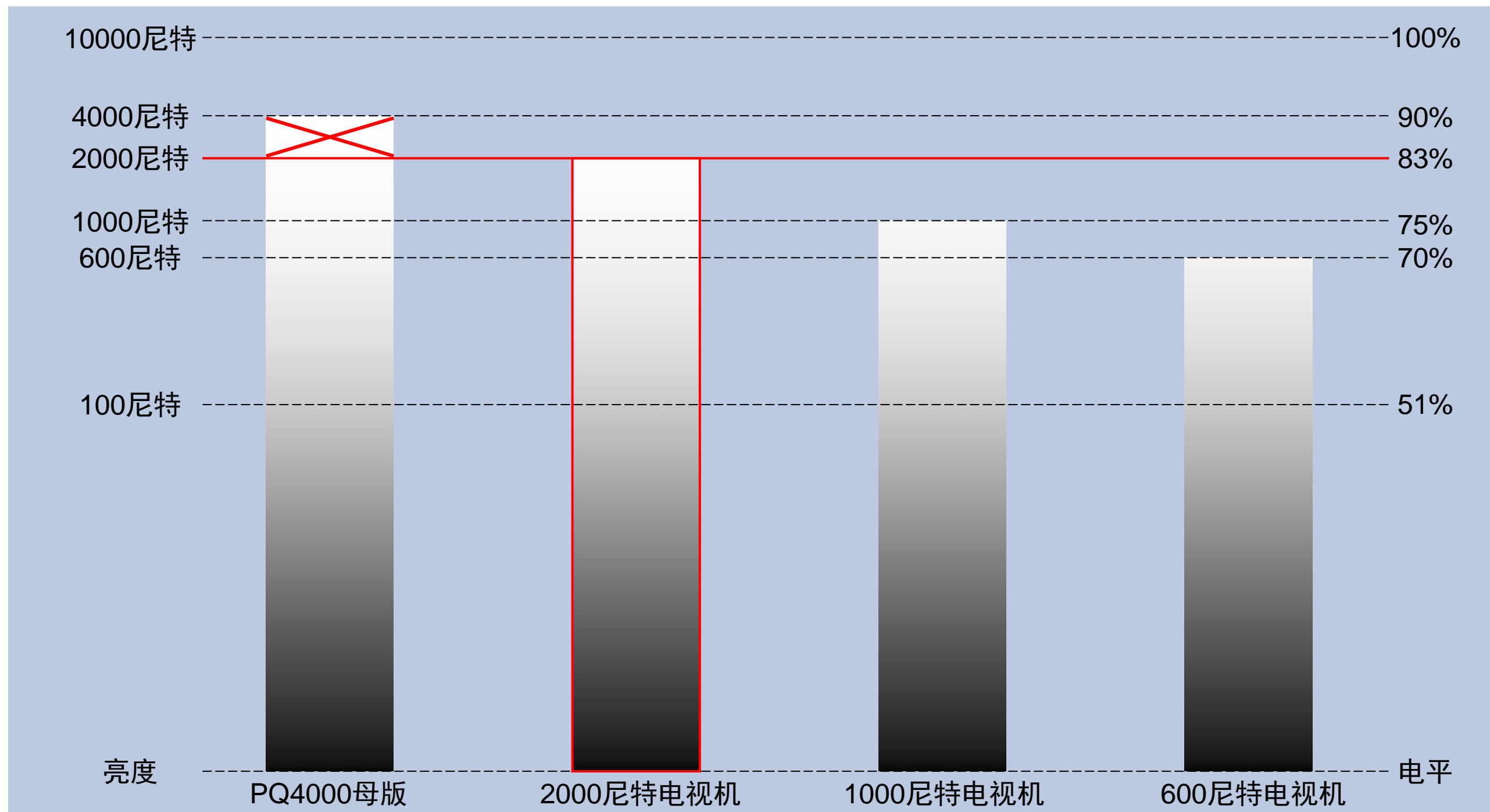
PQ电视系统伽玛特性（线性坐标，归一化）



PQ电视系统伽玛特性（对数坐标，归一化）

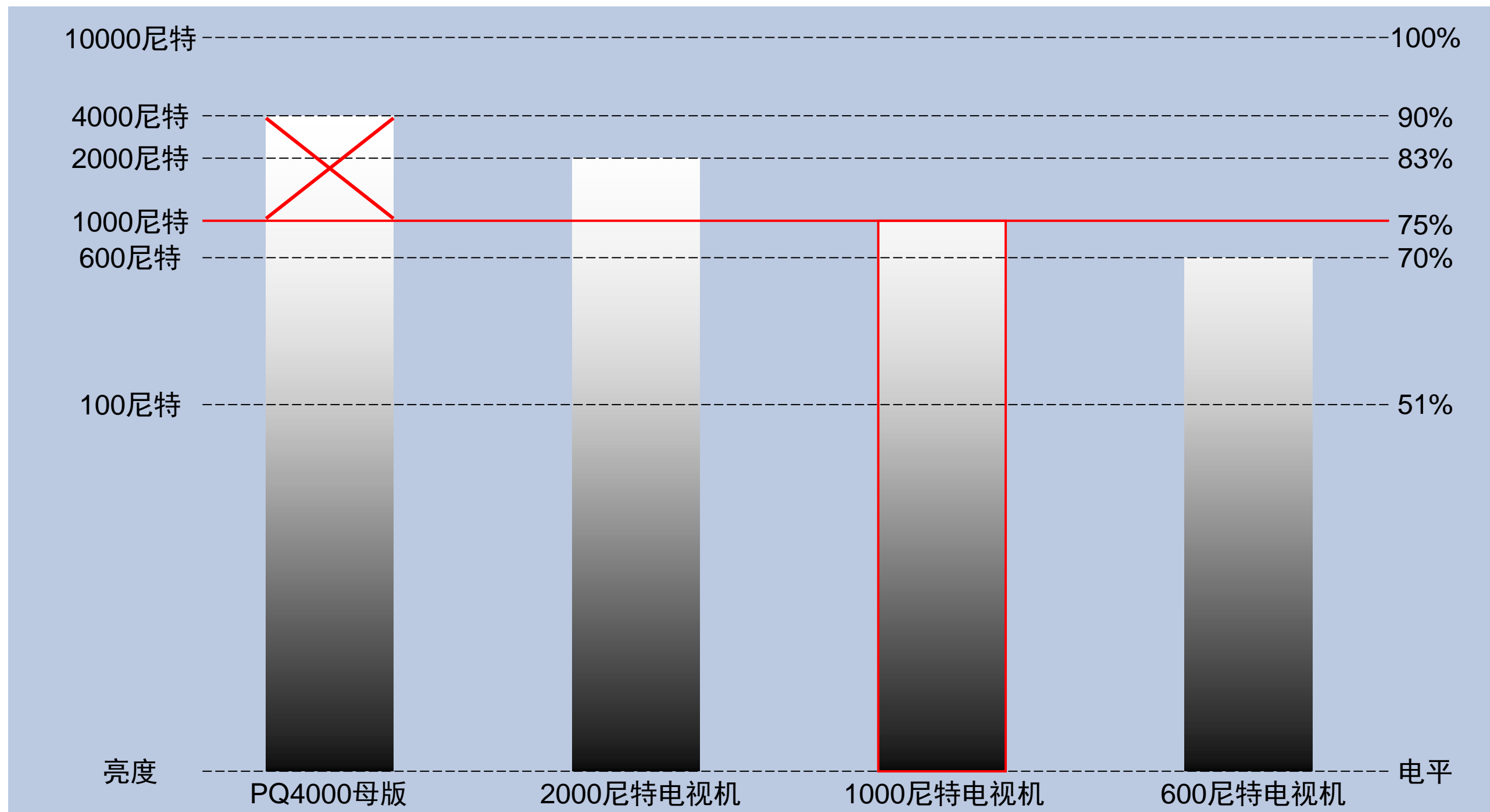
# PQ电视机亮度低于制作监视器时

在PQ绝对亮度体系中母版亮度电平与显示亮度是部分映射关系，低亮度电视机不能显示母版中高于电视机亮度的内容



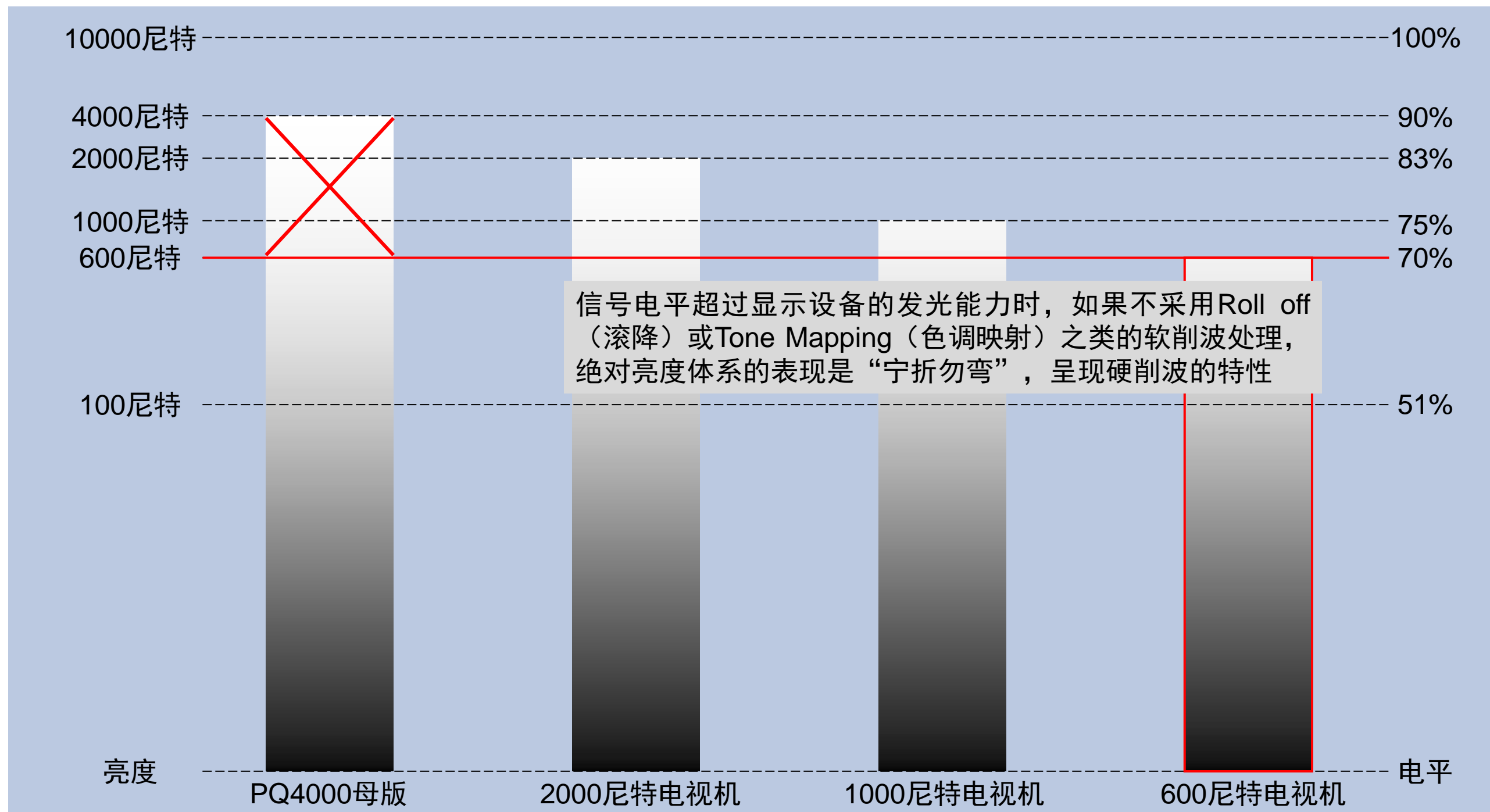
# PQ电视机亮度低于制作监视器时

在PQ绝对亮度体系中母版亮度电平与显示亮度是部分映射关系，低亮度电视机不能显示母版中高于电视机亮度的内容



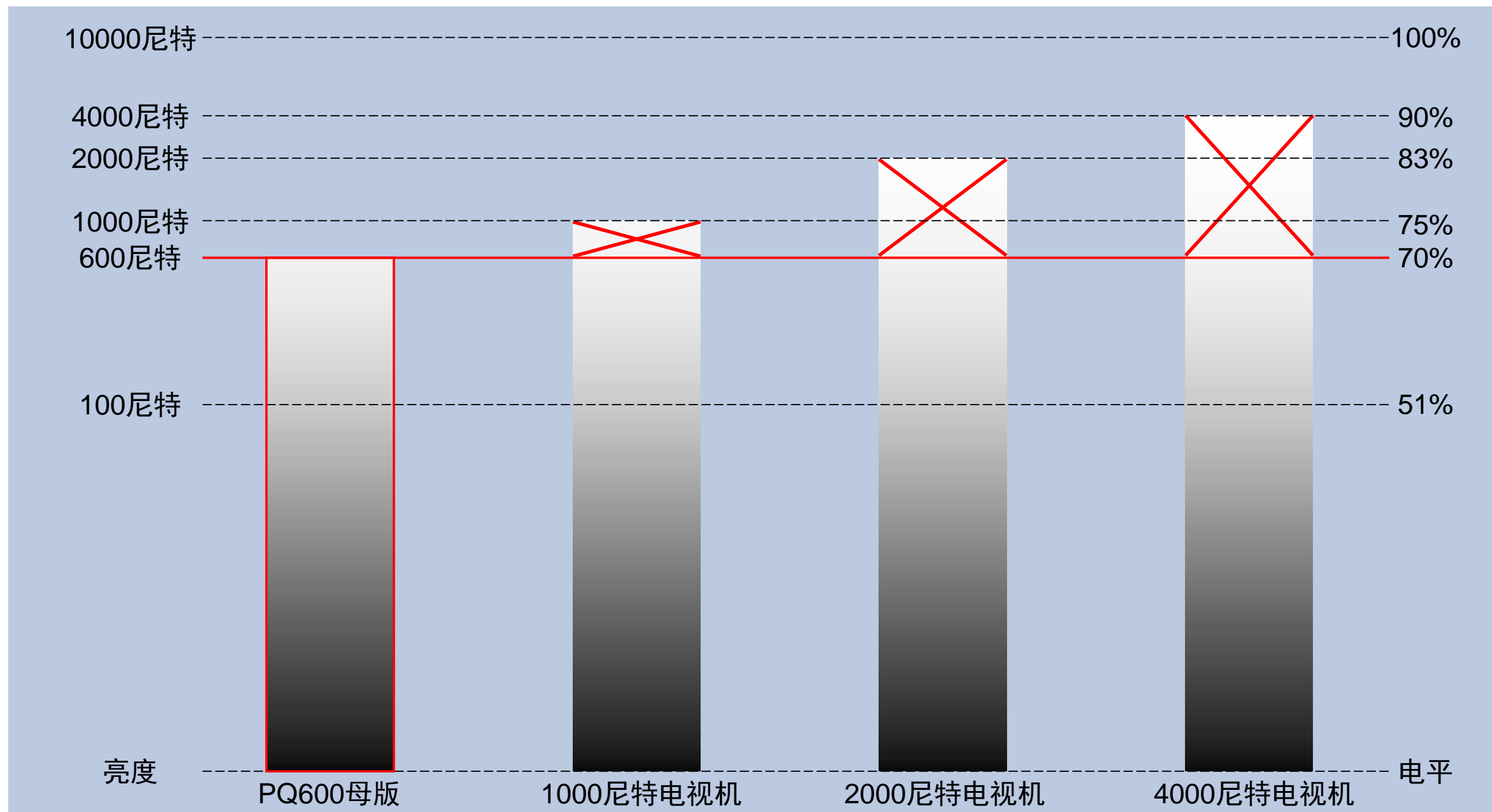
# PQ电视机亮度低于制作监视器时

在PQ绝对亮度体系中母版亮度电平与显示亮度是部分映射关系，低亮度电视机不能显示母版中高于电视机亮度的内容



# PQ电视机亮度高于制作监视器时

在PQ绝对亮度体系中母版亮度电平与显示亮度是部分映射关系，电视机亮度高于制作母版时只能显示与母版相同的最高亮度



# PQ小结 - I

## □定义

- PQ定义了EOTF，依据EOTF和HDR参考白基准亮度可得到PQ的HDR参考白基准电平，根据PQ的EOTF反函数（ $EOTF^{-1}$ ）和OOTF可求出OETF，然后根据HDR参考白基准电平确定OETF的使用方法
- PQ的EOTF曲线是唯一的，不变的

## □HDR参考白基准亮度

- HDR制作初期，参照SDR监视器标准，HDR参考白基准亮度为100尼特，依据EOTF参考白基准电平51%PQ
- BT.2408建议HDR参考白基准亮度为203尼特，由PQ EOTF可知，HDR参考白基准电平应为58%PQ
- 100%动态范围对应的电平从51%调整为58%后，显示光动态范围从10000%下降到4930%

## □OOTF、OETF

- BT.2100建议PQ的OOTF与SDR的OOTF一致，并说明了把SDR的亮度扩展到PQ亮度范围的方法
- 由BT.2100建议的PQ OOTF与 $EOTF^{-1}$  可得到PQ OETF，其100%动态范围对应45%PQ电平，305%动态范围对应58%PQ，而BT.2408建议100%动态范围对应58%PQ电平，因此需要把PQ的动态范围压缩3.05倍
- 100%动态范围对应的PQ OETF电平从45%调整为58%后PQ OETF的动态范围下降到3280%
- 直播制作必须定义摄像机的OETF，但调色制作的录播制作并不需要PQ OETF

## □与HLG、SDR不同，PQ的伽玛特性并不是来自函数公式，而是来自人眼特性

- PQ EOTF公式完美模拟了人眼特性

# PQ小结 – II

## □ 精度高

- PQ伽玛完全模拟人眼灵敏度特性，OETF对动态范围的压缩、EOTF对动态范围的扩展比非常大
  - 在暗部PQ电平的微小改变会使显示亮度发生很大变化，因此对显示设备和观看环境的要求很高
  - 因为PQ对制作精度的要求比HLG高，所以几乎所有用PQ制作的节目都是调色师反复精心调整的结果

## □ 元数据

- 为提高显示精度，需要在PQ播出码流中同时传输元数据
  - 静态元数据：标识了制作监视器硬件性能和节目的平均、最高亮度，其作用是实现显示适配
  - 动态元数据：Dolby Vision对不同场景匹配不同的参数优化显示图像质量，实现了场景适配

## □ 劣势

- 电平和亮度资源利用率低
  - 电平：例如，PQ1000的信号电平最高为75%，信号电平（量化）资源利用率只有75%
  - 亮度：例如，在2000尼特PQ显示设备上显示PQ1000信号时，显示设备的亮度资源利用率只有50%

## □ 与SDR相比，可以说PQ是对传统电视的“革命（Revolution）”

- 采用有别于大多数显示设备的绝对亮度体系

# 绝对与相对亮度体系

## 绝对亮度体系

- 显示亮度只与信号电平有关，与显示设备无关，用一条EOTF曲线就可以表达显示设备的特性
  - 当信号电平在显示设备的发光能力范围之内时，电平与显示亮度呈现由EOTF定义的对应关系
  - 当信号电平超过显示设备的发光能力时，如果不采用Roll off之类的软削波处理，绝对亮度体系的表现是“宁折不弯”，呈现硬削波的特性，不能再现超过显示设备峰值亮度电平的信息
  - 对绝对亮度体系来说，显示峰值亮度越高再现的动态范围越大，但肤色亮度不变
- 为电影而生的绝对亮度体系
  - 在显示设备和观看环境严格可控的条件下，PQ绝对亮度体系能够获得最高质量的HDR图像
    - ❖ 观众与导演、调色师看到的图像质量相同，能够向观众完美传递导演和调色师的创作意图
  - 同时具备这两个条件的场所是调色工作室和影院（包括放映室）

## 相对亮度体系

- 显示亮度不但与信号电平有关，还与显示设备有关，信号的最高电平对应显示设备的最高亮度
  - 峰值亮度不同时EOTF曲线也不一样，不同的峰值亮度对应不同的曲线
  - 无论显示设备的峰值亮度高低，相对亮度体系都能再现信号电平的全部信息
  - 显示屏峰值亮度的高低与再现的动态范围无关
  - 对相对亮度体系来说，超过1000尼特时需要更高显示亮度的原因通常是因为环境亮度比较高
- 广泛应用
  - 电视自诞生以来一直采用相对亮度体系，大部分图像显示设备也都是相对亮度体系
  - BT.2100推荐的相对亮度体系采用HLG伽玛，与传统电视的差别是引入了可变伽玛
  - 优势：电平和亮度资源利用率高，对显示设备和观看环境的要求相对宽松
  - 劣势：制作端对用户端显示设备没有控制手段，导演与观众看到的图像质量可能有较大差别
  - 在显示设备和观看环境不可控的环境中，引入了可变伽玛的相对亮度体系更具优势

# SDR、HLG、PQ的OOTF

## □基本关系

■ 因为 $OOTF = OETF \times EOTF$ ，所以 $OETF = OOTF \times EOTF^{-1}$ ， $EOTF = OOTF \times OETF^{-1}$

## □SDR电视的系统伽玛1.2是电视行业OOTF的基准

■ 为了保持与SDR电视相同的观感，ITU建议HLG和PQ的OOTF均为1.2

- HLG采用可变伽玛，峰值亮度1000尼特时 $OOTF = 1.2$
- PQ OOTF采用扩展SDR亮度范围的方法，把SDR显示峰值亮度100尼特扩展到PQ的10000尼特，峰值亮度100尼特以下时PQ OOTF与SDR OOTF完全相同，OOTF曲线重合

## □PQ的EOTF是唯一的、不可变的

■ PQ  $EOTF^{-1}$ 也是不变的

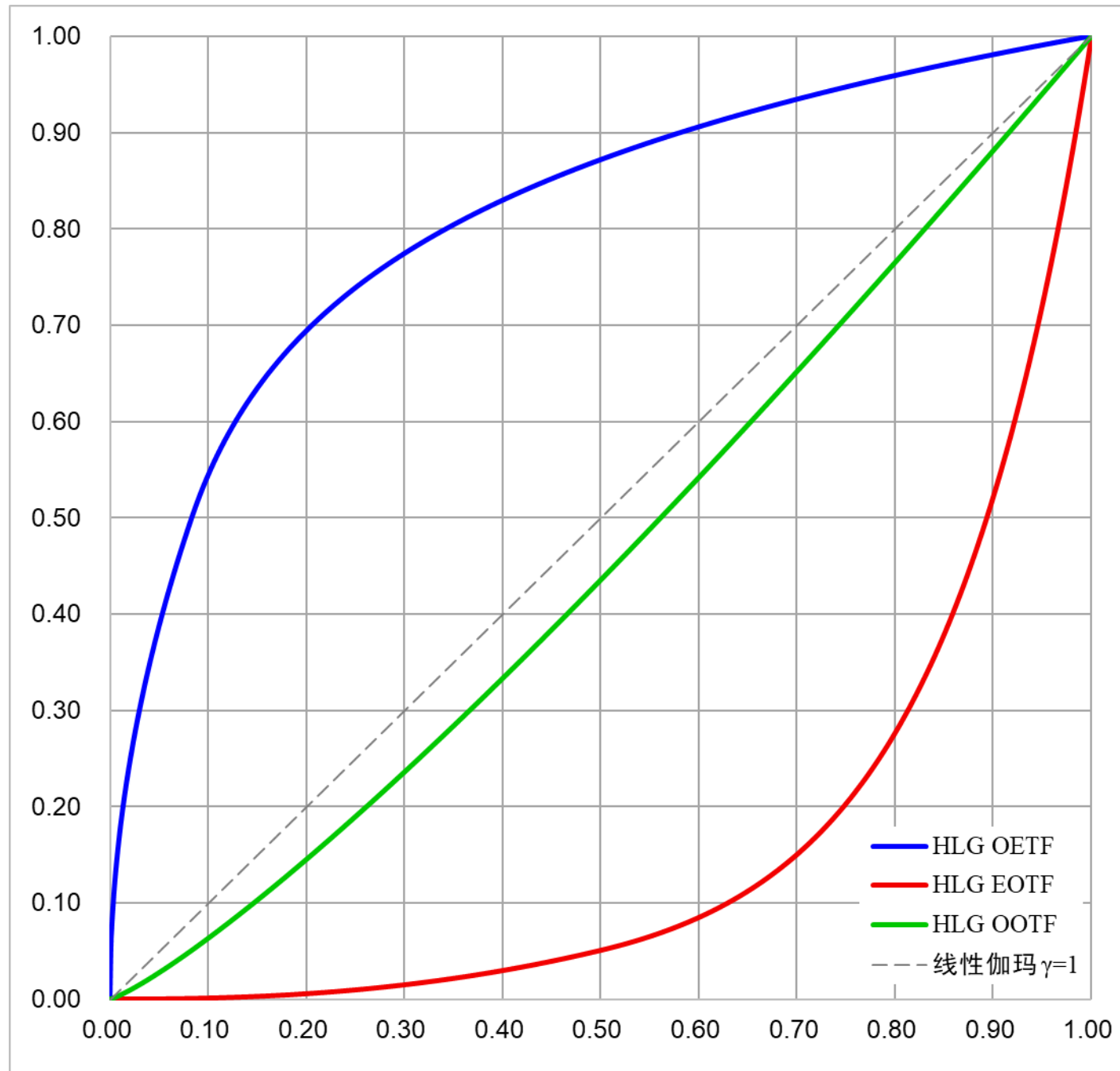
## □HLG的OETF是唯一的、不可变的

■ HLG  $OETF^{-1}$ 也是不变的

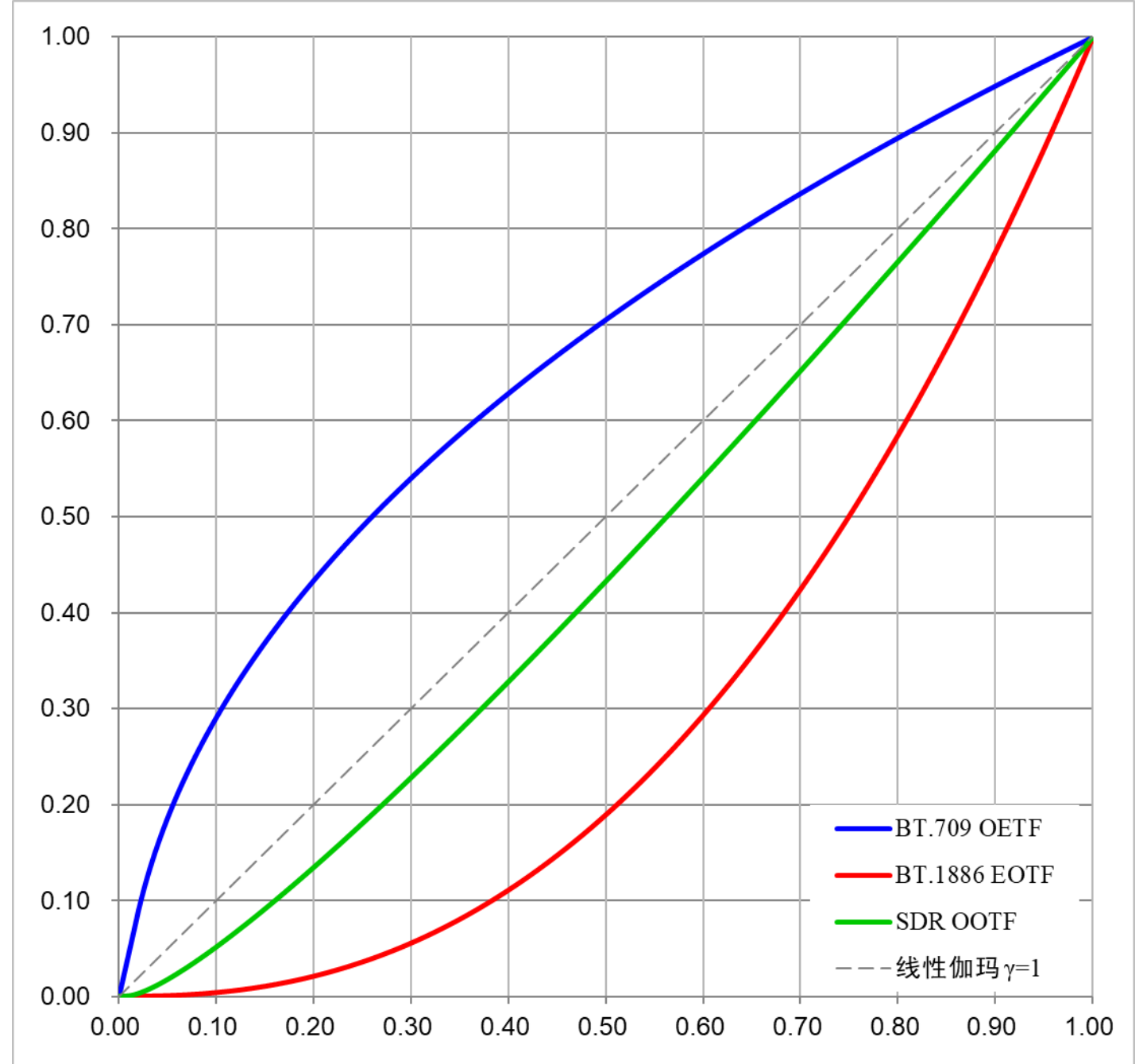
■ HLG的OOTF值就是可变伽玛值，是可变的

- 显示峰值亮度1000尼特时可变伽玛/ $OOTF = 1.2$
- 显示峰值亮度越高可变伽玛/ $OOTF$ 值越大，峰值亮度越低可变伽玛/ $OOTF$ 值越小
- 峰值亮度不同时根据公式获得不同的可变伽玛/ $OOTF$ 值，HLG EOTF也随之确定

# HLG与SDR的OOTF比较

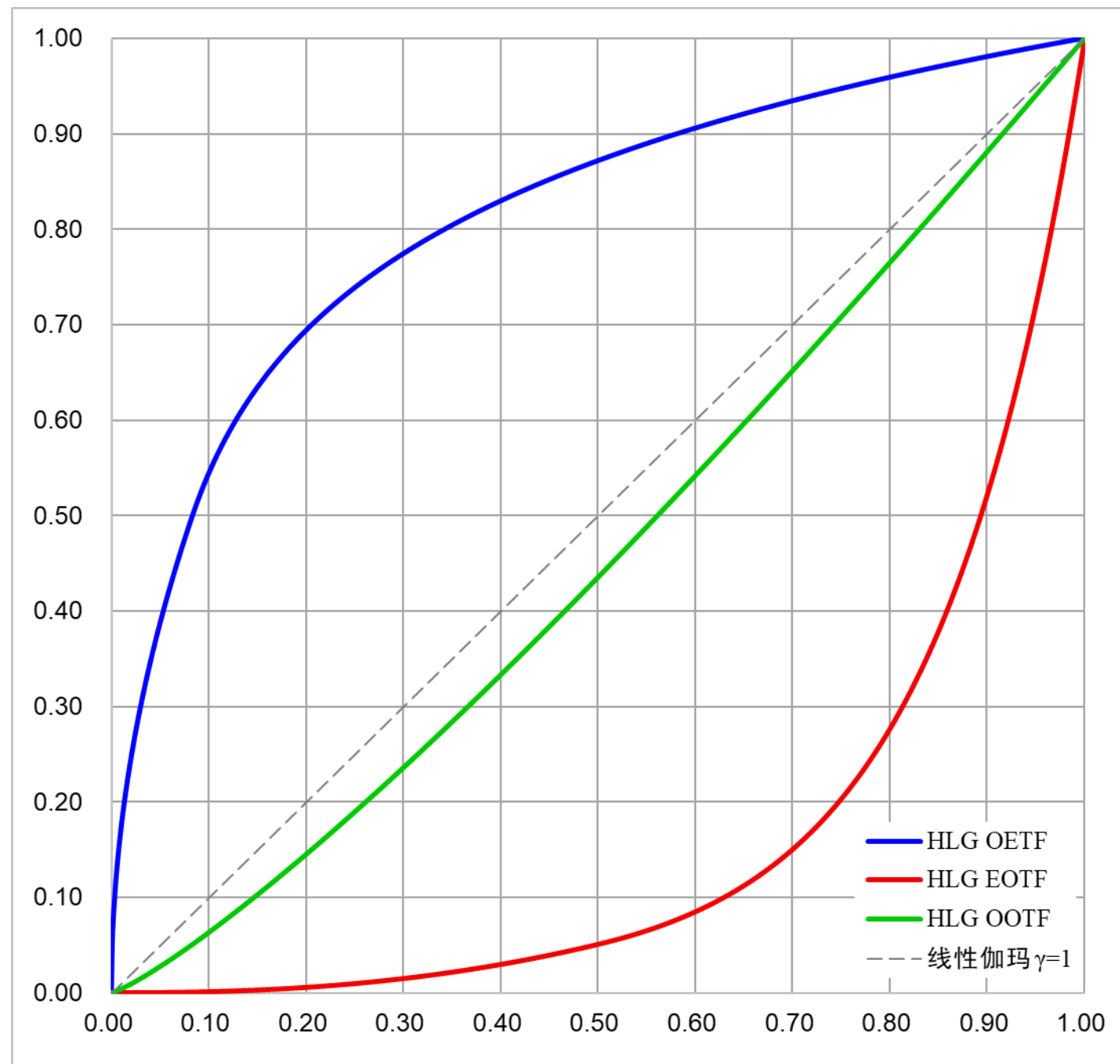


HLG伽玛特性 (归一化)

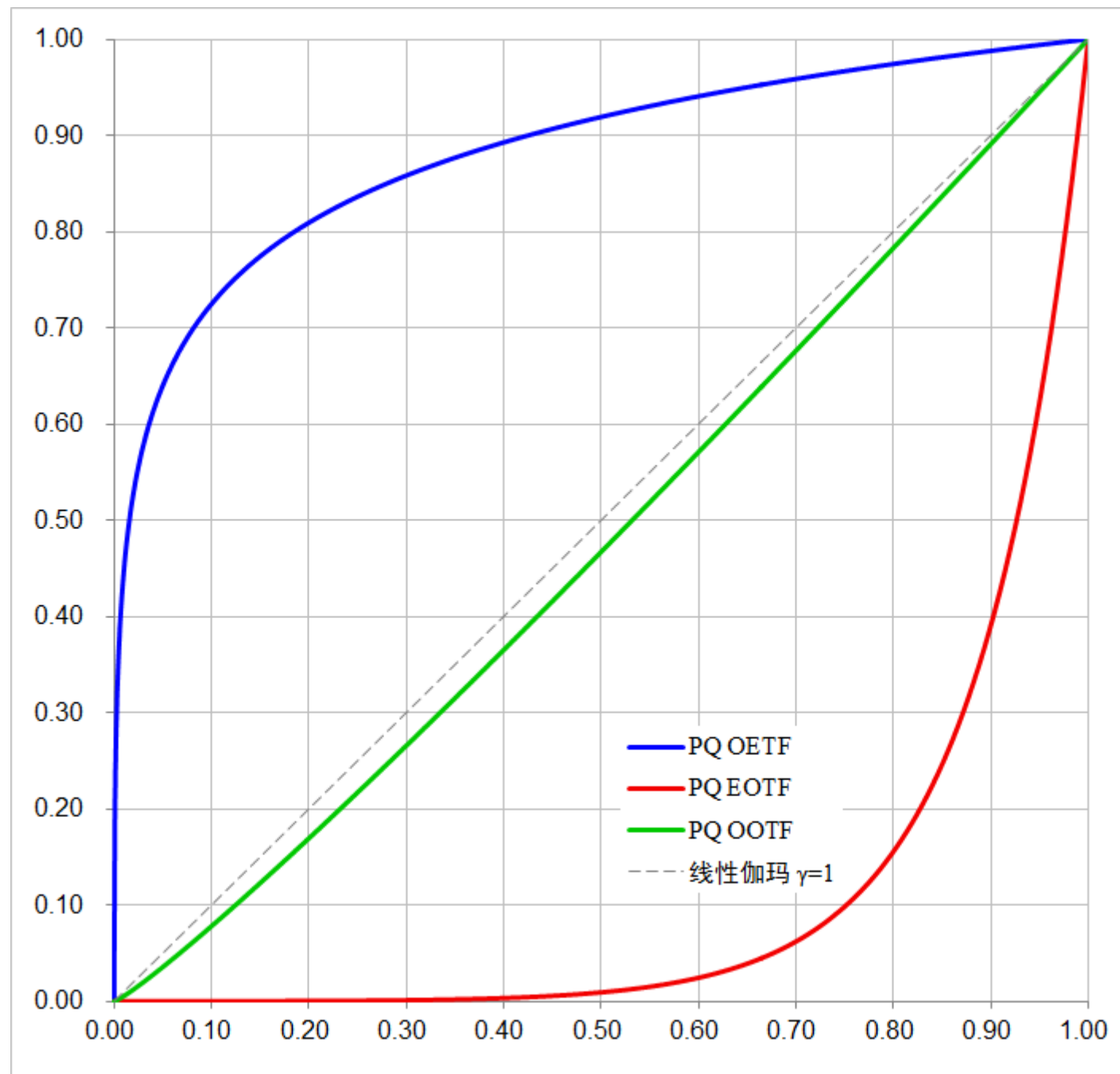


SDR电视伽玛特性 (归一化)

# HLG与PQ的OOTF比较



HLG伽玛特性 (归一化)



PQ伽玛特性 (归一化)

# 小结 – HDR伽玛的演进

## □ 早期

### ■ PQ

- 构建全新的HDR体系，不考虑兼容SDR
- 只定义了EOTF，未定义OETF
- 参照SDR，以显示峰值白亮度100尼特为100%动态范围的亮度基准，依据EOTF对应电平为51%

### ■ HLG

- BBC与NHK的共识
  - ❖ 对以SDR OETF（BT.709伽玛+拐点）和EOTF（BT.1886）为基础的现有电视体系加以改进，使之符合HDR拍摄、显示需求，有限兼容SDR
  - ❖ OETF
    - 分为两段：低于50%电平的部分采用基于幂函数的电视伽玛处理100%以下动态范围内容，与传统SDR摄像机伽玛相似，高于50%电平的部分采用对数伽玛处理高光，是对SDR OETF拐点的改进
  - ❖ EOTF
    - BBC采用可变伽玛，环境光越亮系统伽玛值越大
    - NHK采用固定伽玛，系统伽玛值1.2，峰值亮度2000尼特，根据其EOTF计算50%电平（100%动态范围）显示亮度101尼特，与SDR峰值白亮度相同

## □ BT.2100

### ■ 推荐了PQ和HLG的OOTF，定义了PQ的EOTF、HLG的OETF

- HLG采用可变伽玛，显示设备峰值亮度越高系统伽玛值越大

## □ BT.2408

- 建议HDR参考白基准亮度203尼特，与新型SDR液晶电视机峰值亮度相同
- 根据HDR参考白基准亮度和HLG、PQ的EOTF确定了HDR参考白基准电平，以及OETF使用方法
- 建议使用1000尼特监视器制作HDR节目

# HDR与SDR的差别

# 国家/行业对超高清、宽色域、HDR处理方式的差别

## □中国广播电视行业：色域、动态范围与分辨率绑定

- 2K高清：默认BT.709窄色域+SDR
- SDR：默认BT.709窄色域
- 4K超高清：默认BT.2020宽色域+HDR（HLG）
- HDR（HLG）：默认BT.2020宽色域

## □欧美日韩广播行业：分辨率、色域和动态范围没有组合绑定

- 2K高清/4K超高清：窄色域+SDR、宽色域（BT.2020）+HDR（HLG）

## □网络视频行业：分辨率、色域和动态范围没有组合绑定

- 多种分辨率：窄色域+SDR、窄色域+HDR（PQ）、宽色域（P3、BT.2020）+HDR（PQ）

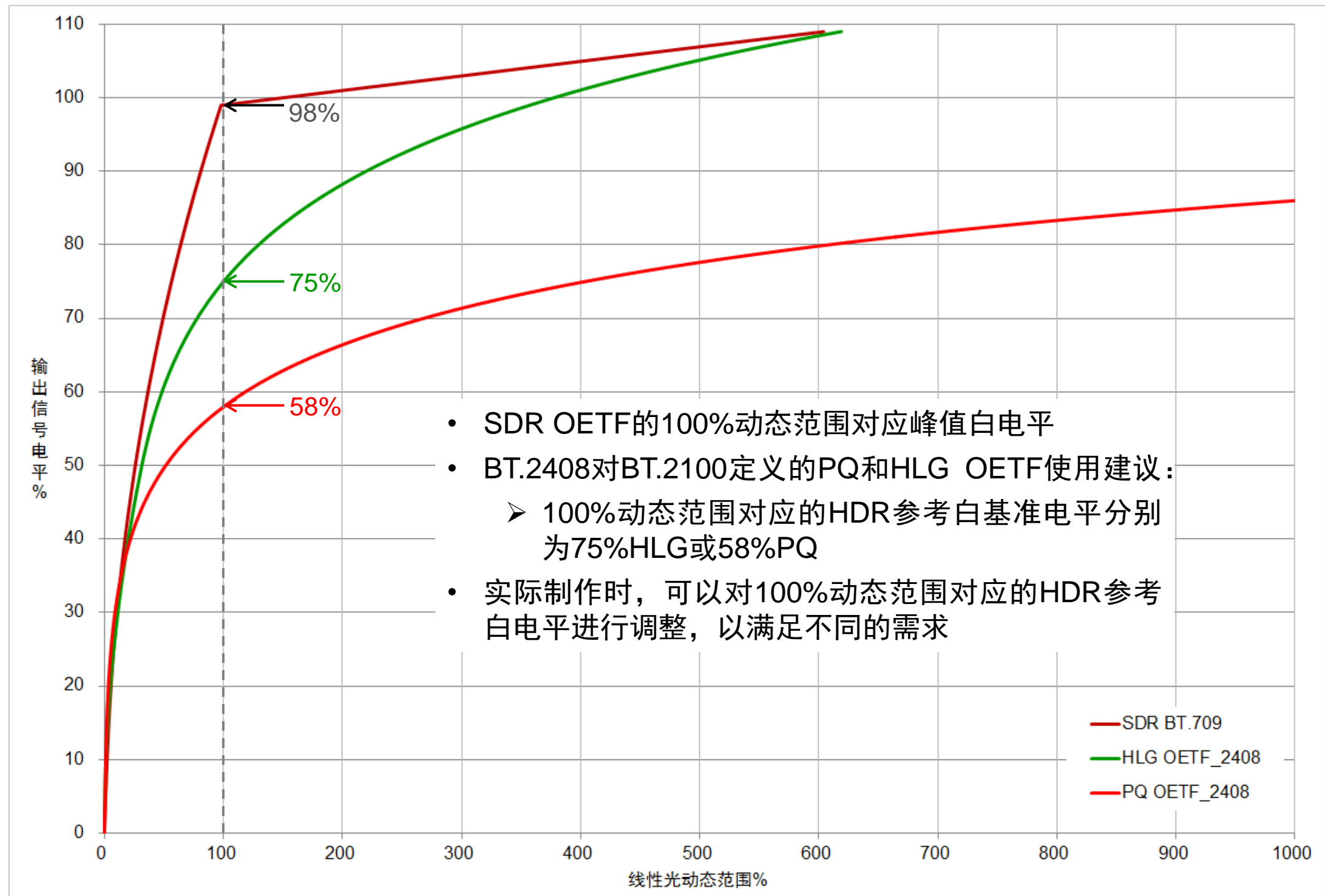
## □蓝光盘：分辨率、色域和动态范围没有组合绑定

- 2K高清/4K超高清：窄色域+SDR、宽色域（P3、BT.2020）+HDR（PQ）
- 内容：以电影和演唱会为主

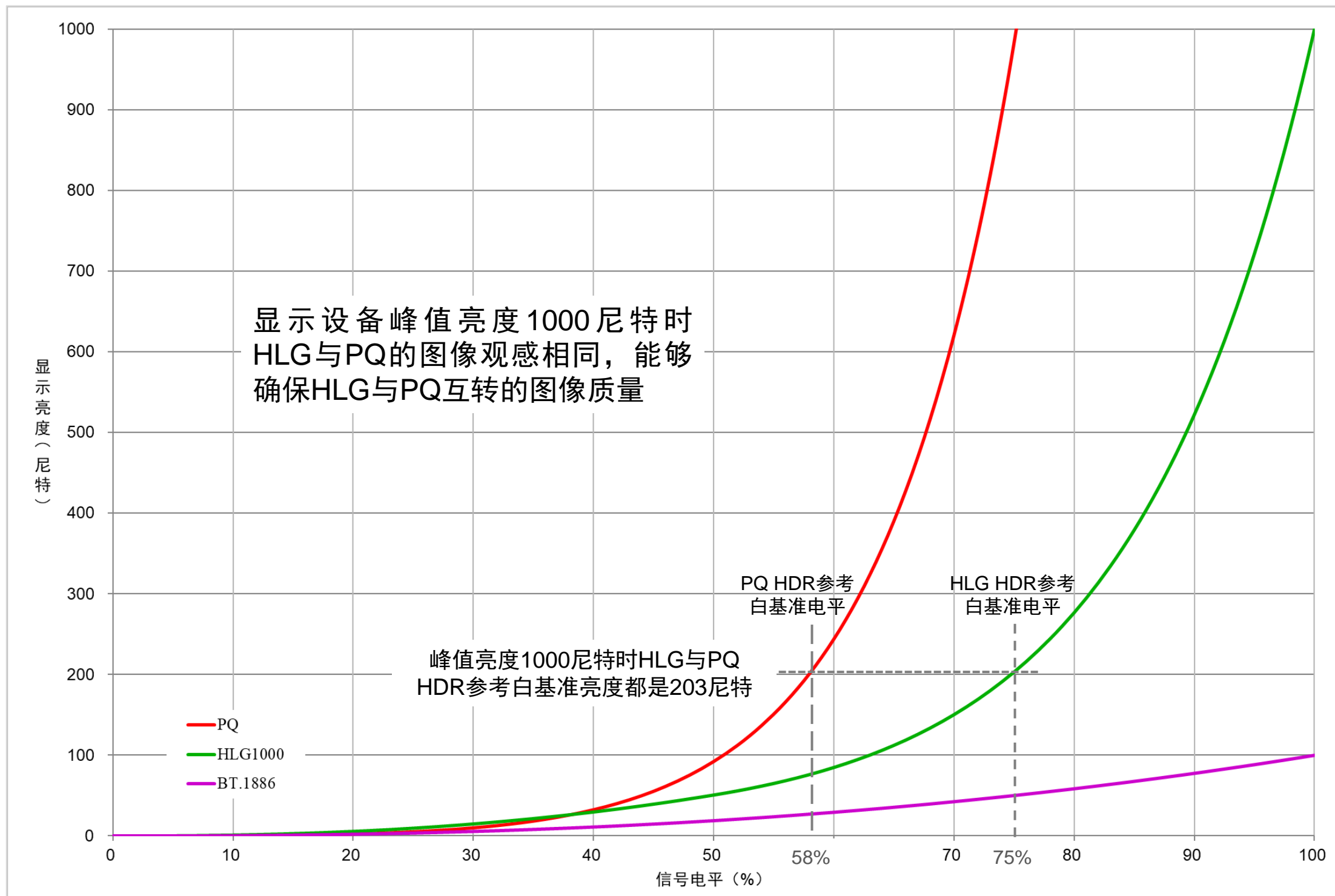
## □在中国广播电视行业，高清与4K的差别体现在下述5个方面

- 分辨率：2K → 4K
- 伽玛：SDR（BT.709/BT.1886） → HLG
- 显示亮度：100尼特 → 1000尼特
- 动态范围：600% → 600%？
- 色域：BT.709 → BT.2020

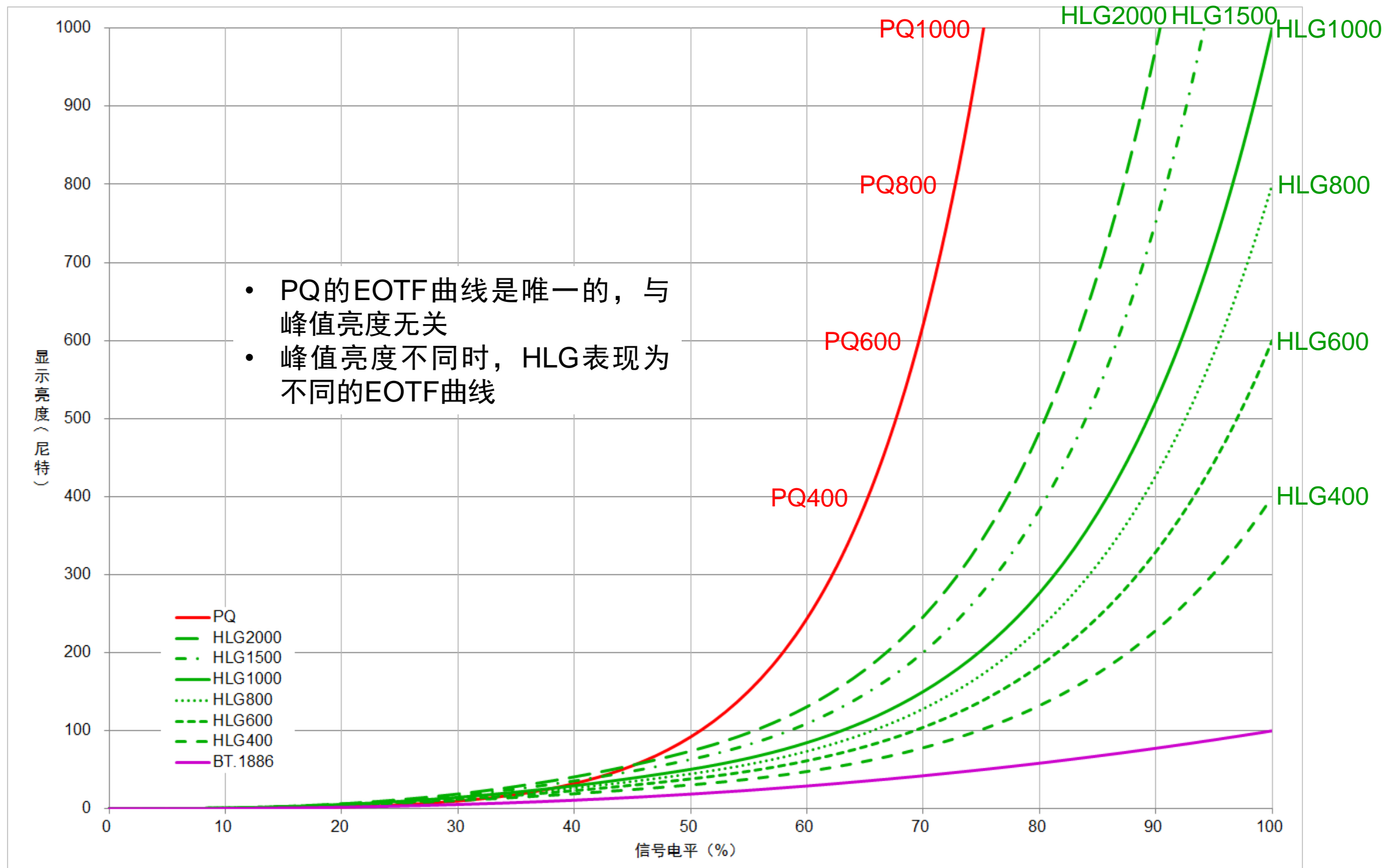
# SDR、HLG、PQ的OETF比较



# SDR、HLG、PQ的EOTF比较



# SDR、HLG、PQ的EOTF比较



# 显示亮度资源分配

□ SDR显示分配给HDR的亮度资源只有23%，HDR显示的大部分资源都用于HDR

## □ 绝对亮度体系PQ

- EOTF曲线是唯一的，显示设备峰值亮度不同时在PQ曲线上只是改变了上截止点的位置
- 在不同峰值亮度的监视器上，58% PQ电平对应的HDR参考白基准亮度都是203尼特
- PQ用于SDR的亮度资源是固定不变的203尼特，显示峰值亮度越高HDR比例越大
- 对绝对亮度体系来说，显示屏峰值亮度越高再现的动态范围越大

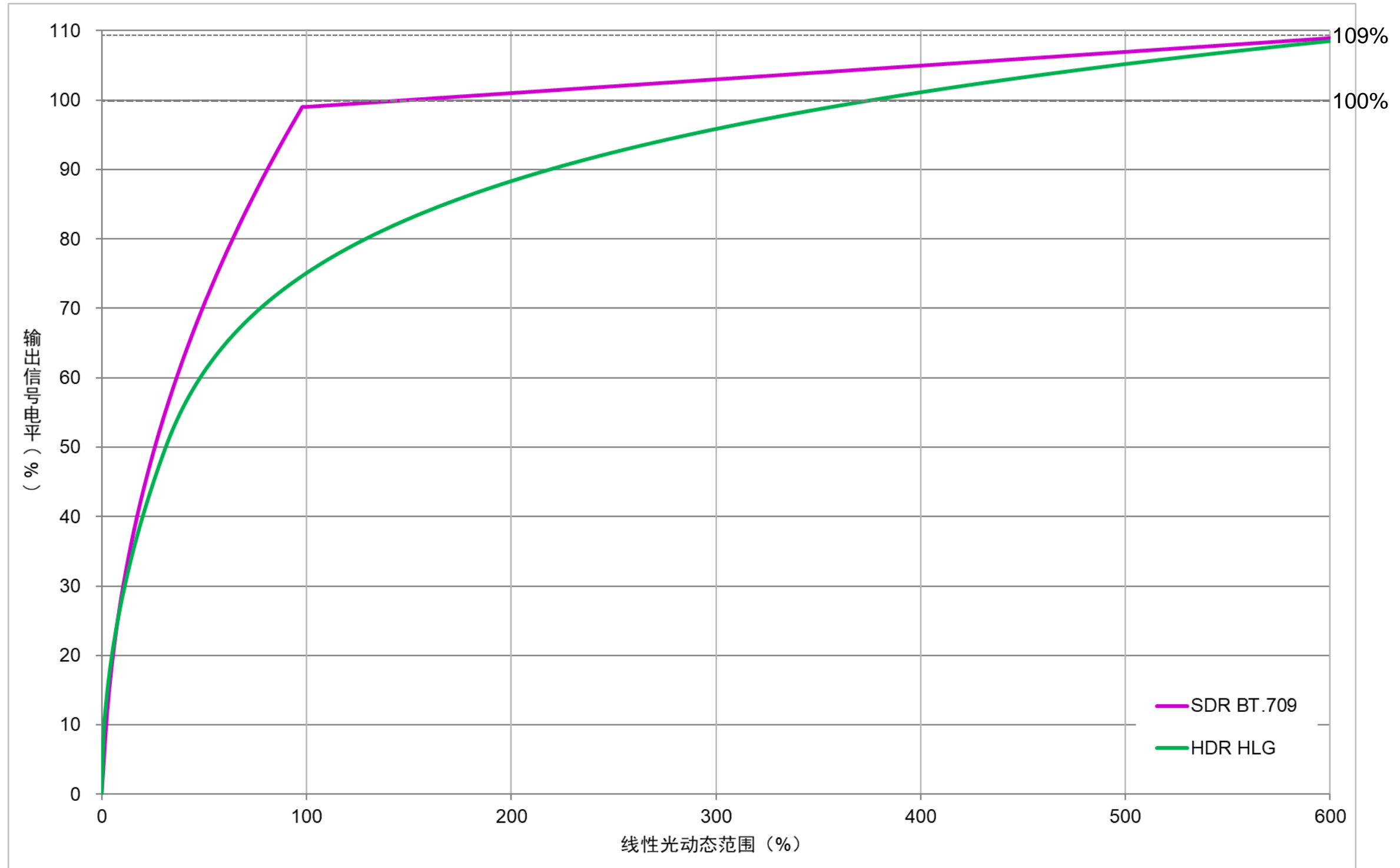
## □ 相对亮度体系HLG

- 显示设备峰值亮度不同时表现为不同的EOTF曲线
- 75% HLG电平对应的HDR参考白基准亮度在不同峰值亮度监视器上是不一样的
  - 1000、800、600和400尼特监视器显示的HDR参考白基准亮度分别为203、172、138和101尼特
- 无论显示峰值亮度高低，HLG用于HDR（75%电平以上）的亮度资源都是75~80%左右，显示屏峰值亮度高低与再现的动态范围无关
- 对相对亮度体系来说，需要更高显示亮度的原因通常是因为环境亮度比较高

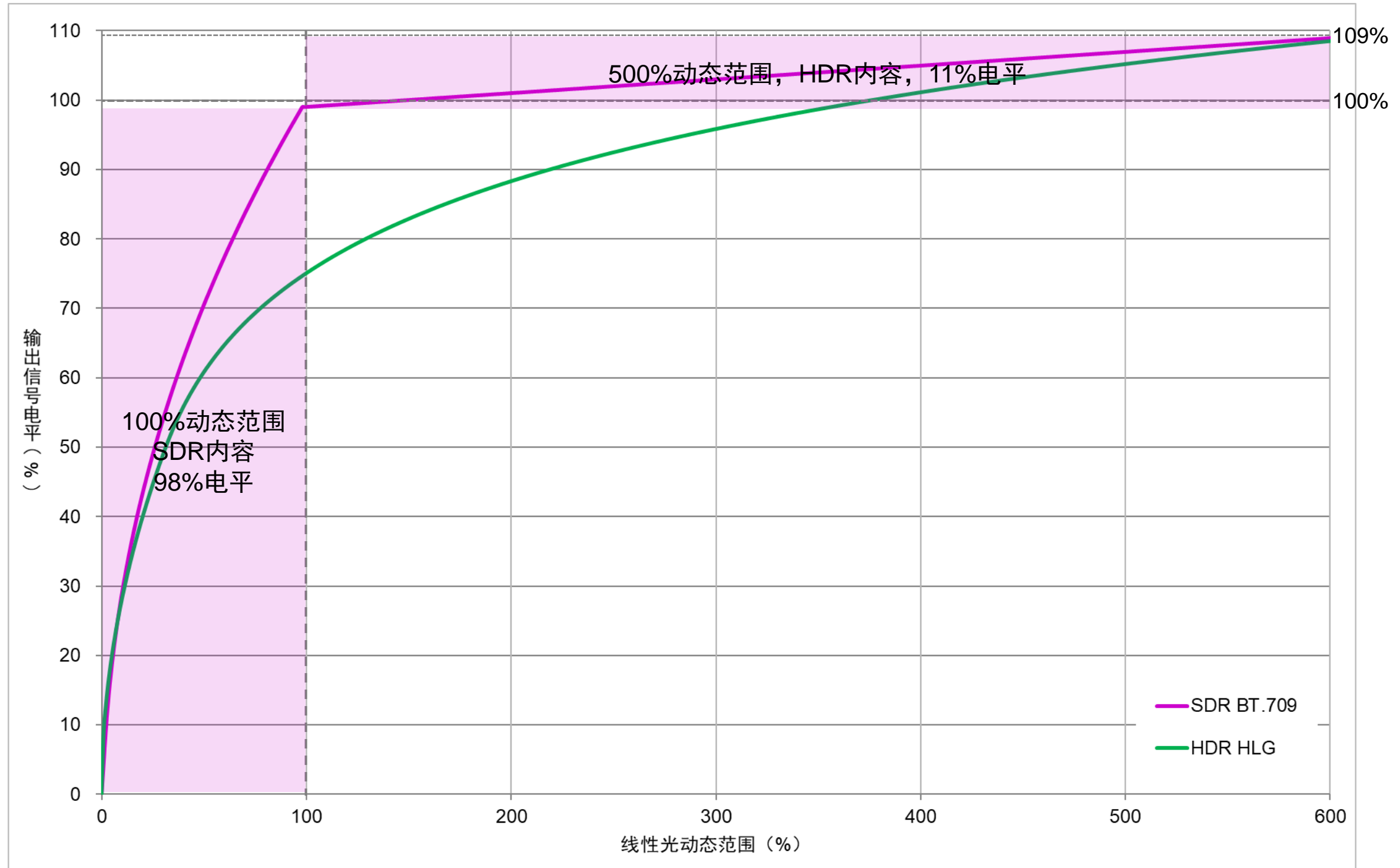
# HLG与SDR的差别

- 从HDR的角度看，可以认为SDR摄像机拐点处理的高亮度内容就是“HDR”
  - SDR电视系统分配给拐点的电平和亮度资源比HDR电视少得多
  - 可以把HLG伽玛曲线高于100%动态范围的HDR部分看作是SDR电视拐点的升级和扩展
  - HLG在兼容现有SDR电视的基础上提升了动态范围，无需元数据，与现有的SDR电视制作流程相似，因此更适合广播电视行业应用
- SDR与HDR的分界点
  - 以线性光动态范围划分
    - 在SDR与HDR电视体系中，以100%线性光动态范围为分界点，低于100%动态范围的内容是SDR，高于100%动态范围的高亮度内容是HDR
  - 以电平划分
    - 在HDR电视体系中，HDR参考白基准电平就是SDR与HDR的分界点
    - 低于75%HLG HDR参考白基准电平的是SDR内容，高于75%HLG电平的是HDR内容
    - 实际制作时，可以对100%动态范围对应的HDR参考白电平进行调整，以满足不同的需求

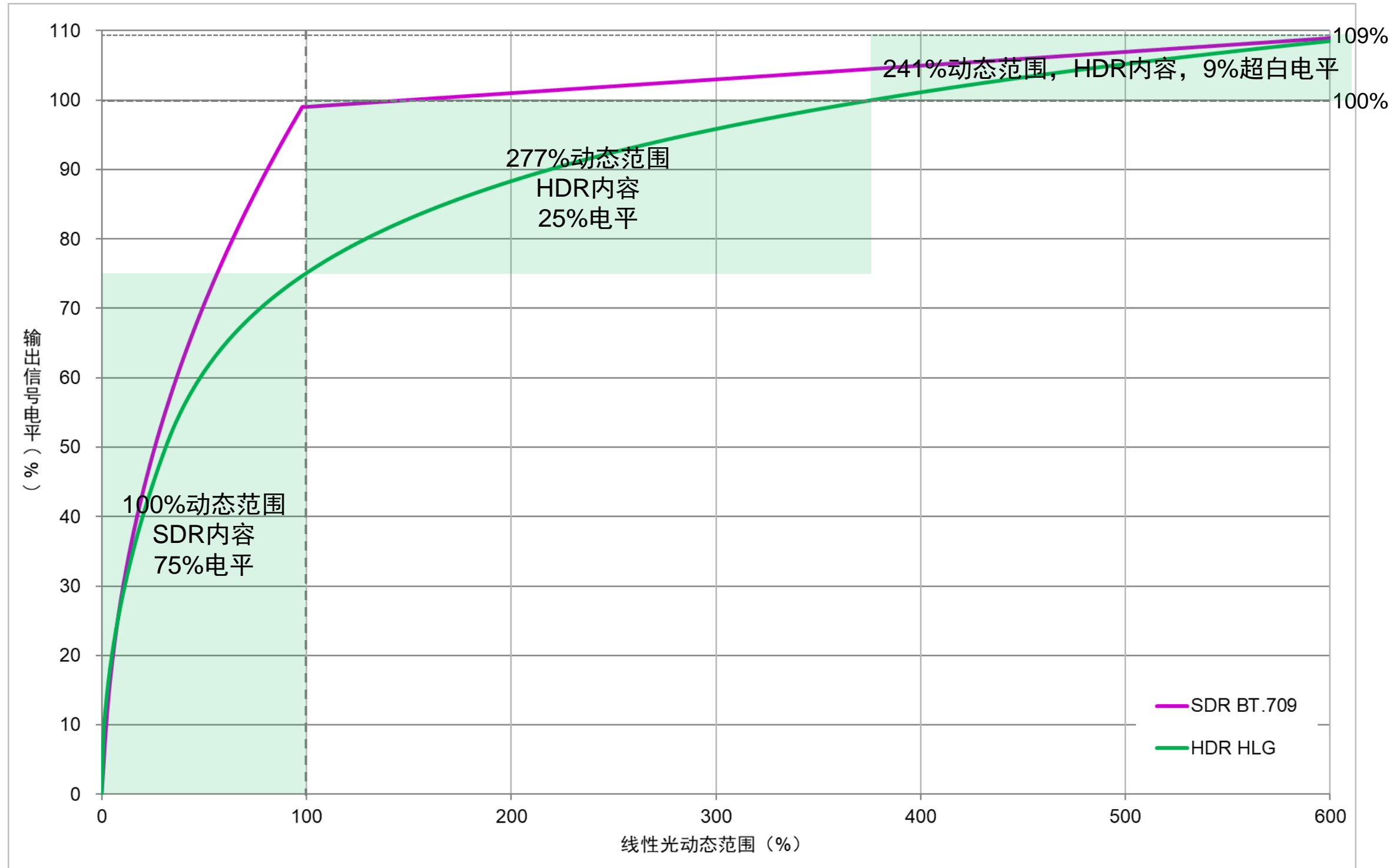
# HLG与SDR的差别 – OETF电平资源分配



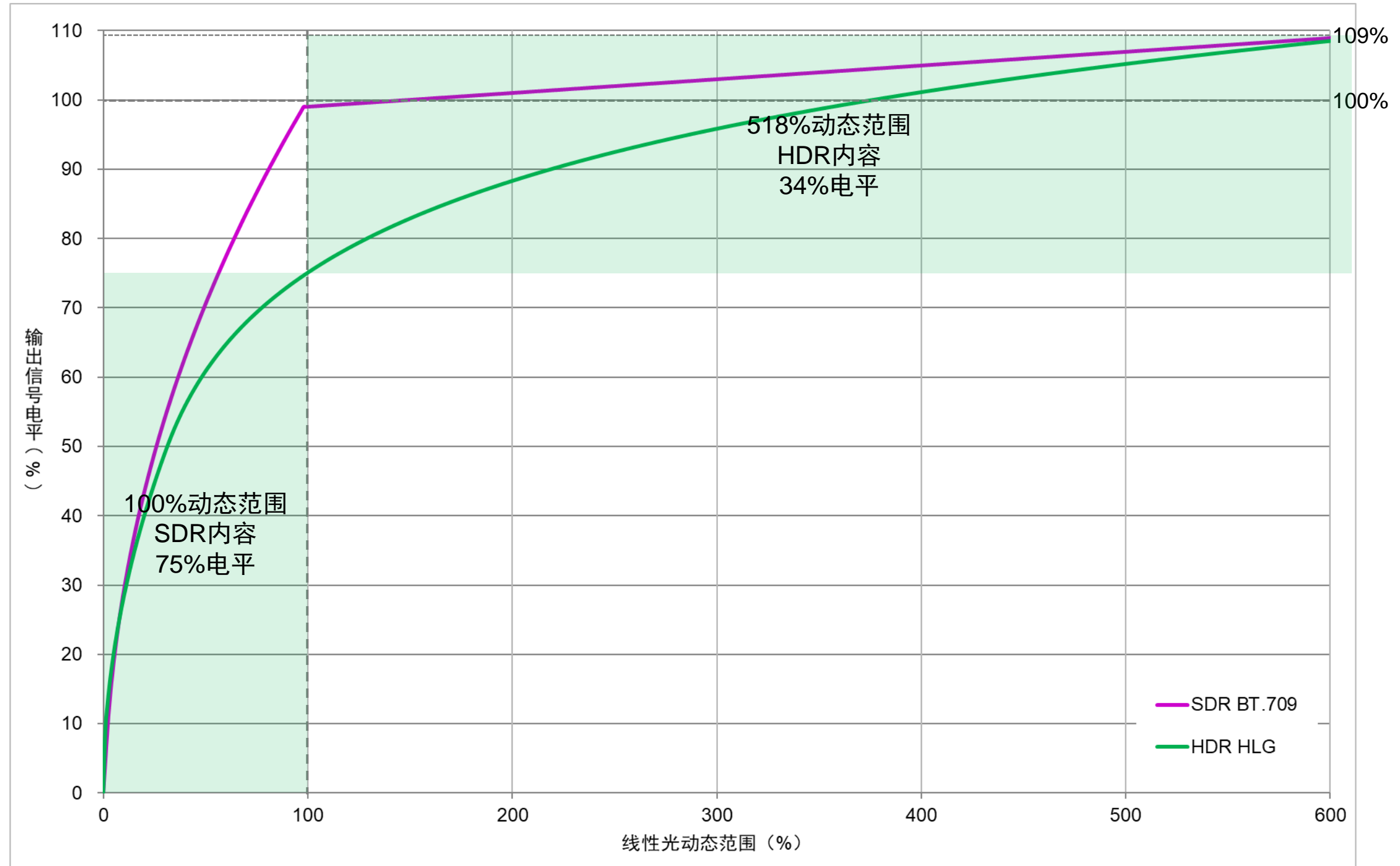
# HLG与SDR的差别 – OETF电平资源分配



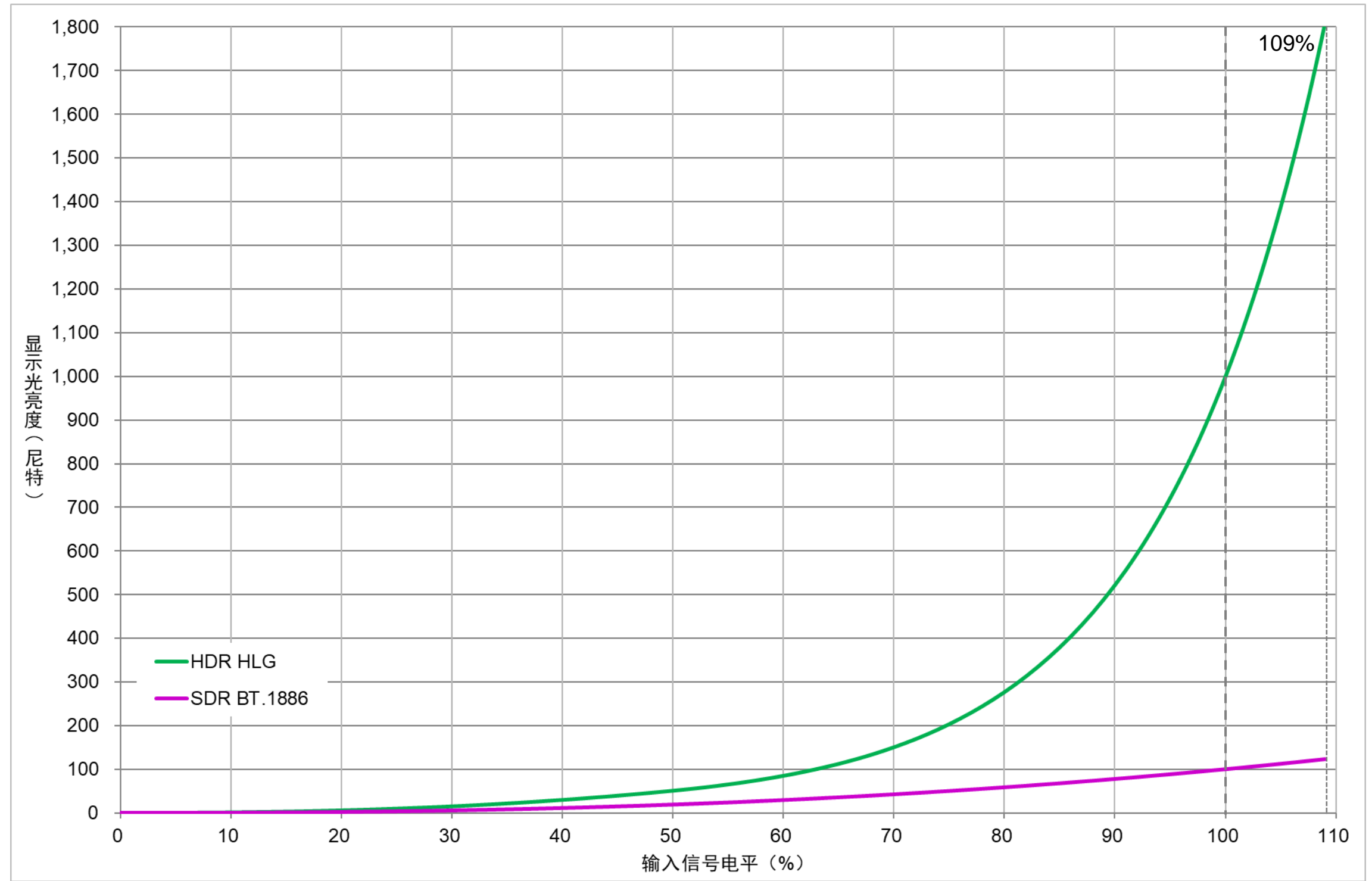
# HLG与SDR的差别 – OETF电平资源分配



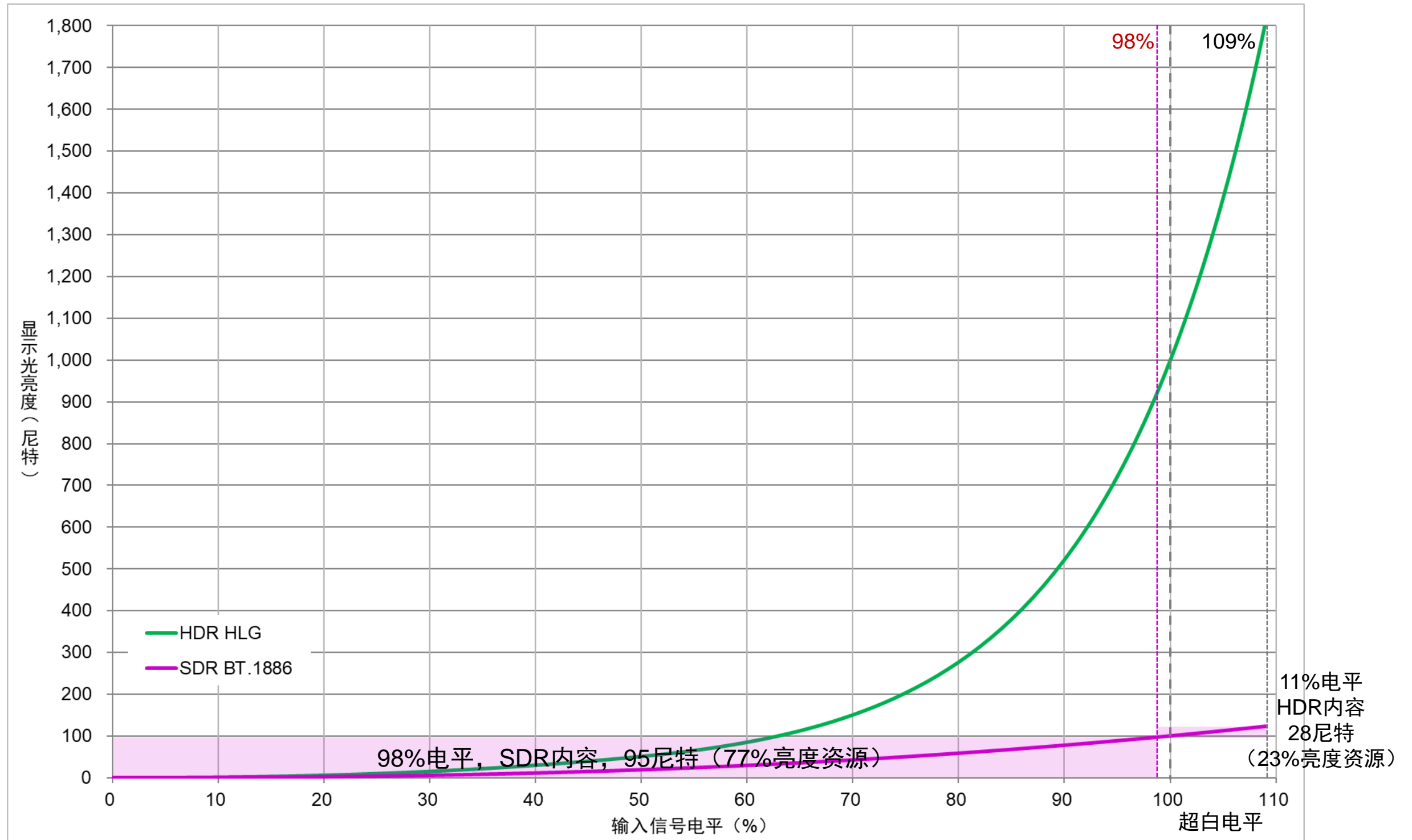
# HLG与SDR的差别 – OETF电平资源分配



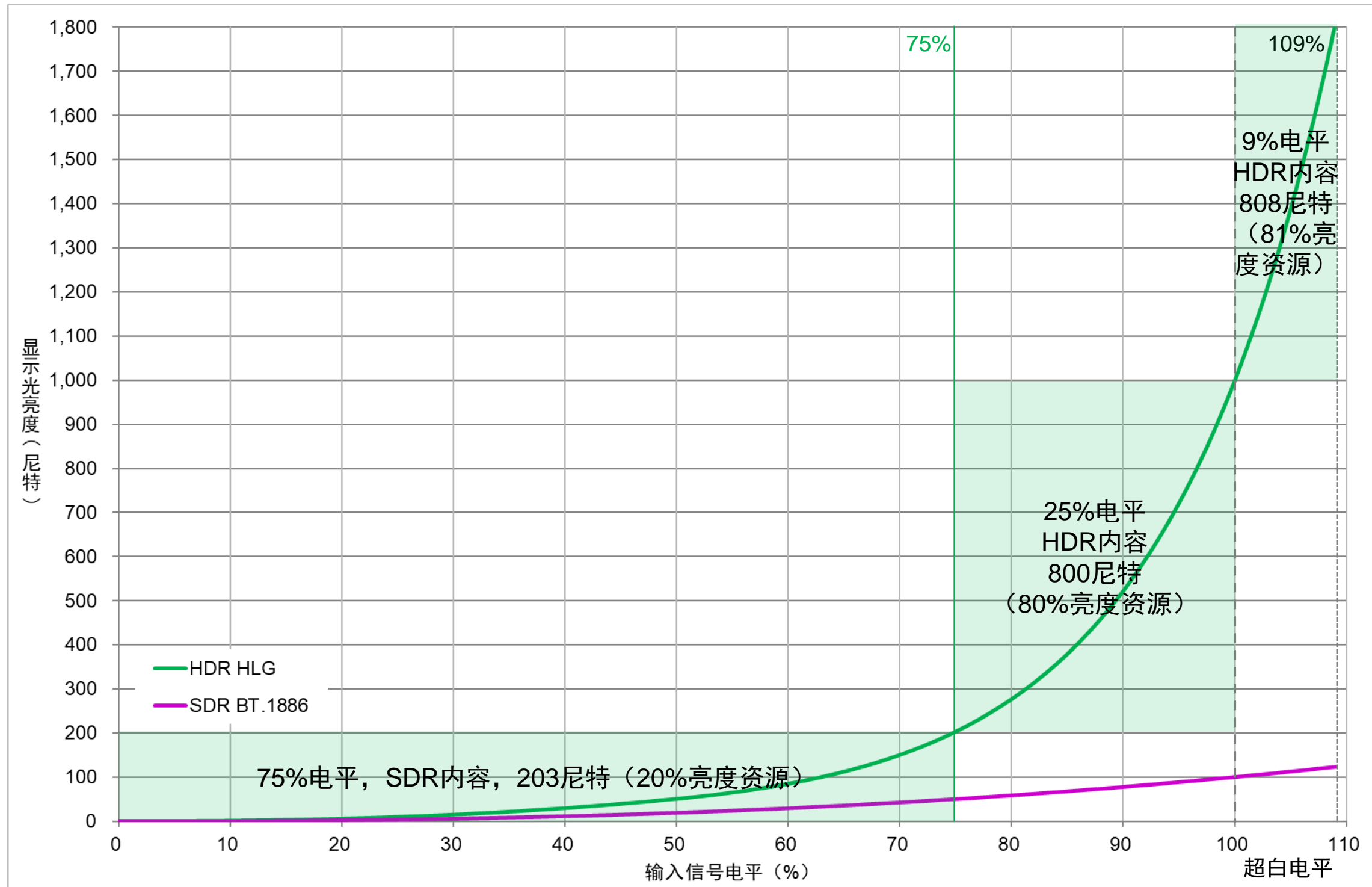
# HLG与SDR的差别 – EOTF显示亮度资源分配



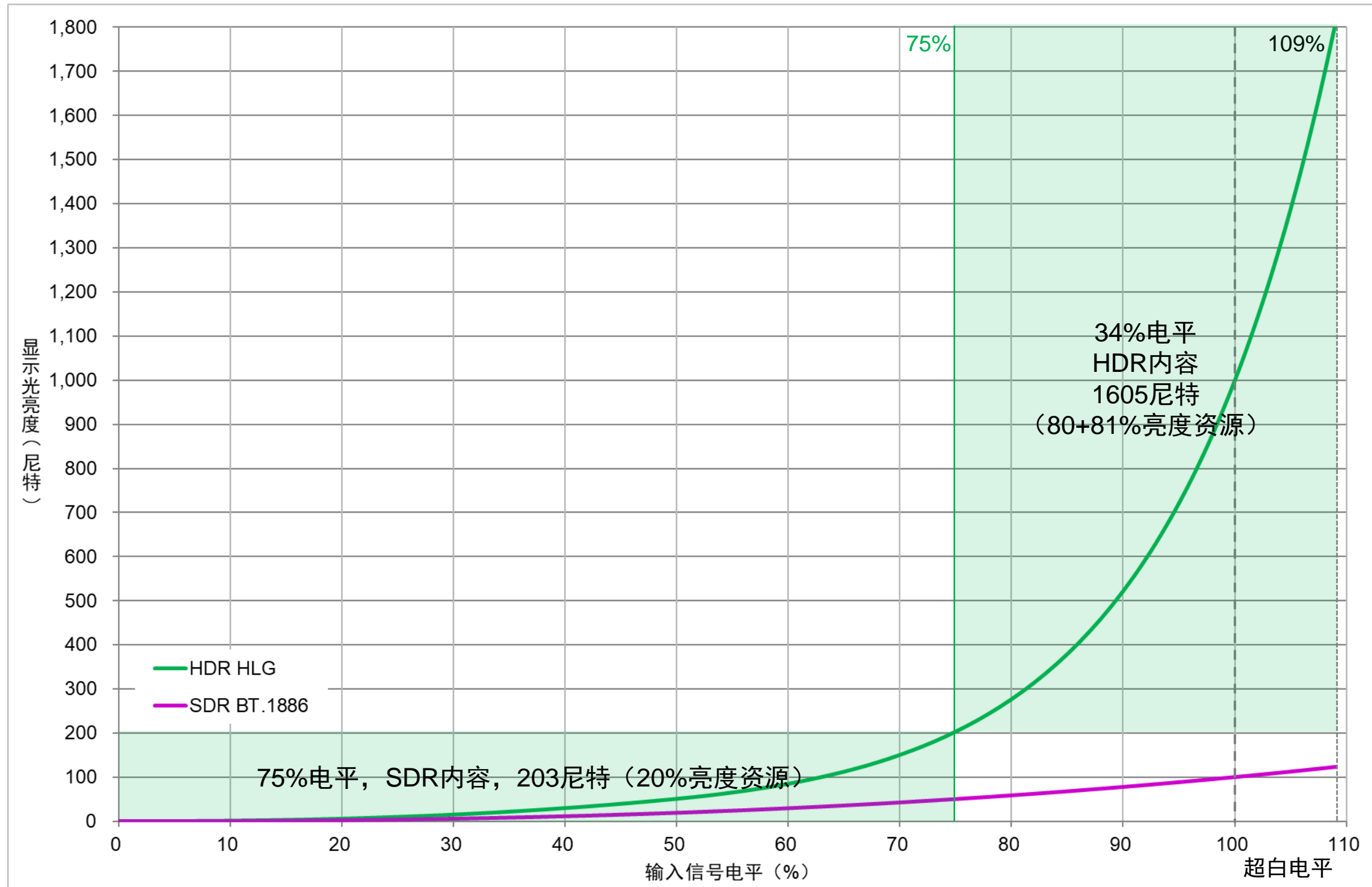
# HLG与SDR的差别 – EOTF显示亮度资源分配



# HLG与SDR的差别 – EOTF显示亮度资源分配



# HLG与SDR的差别 – EOTF显示亮度资源分配



# HDR与SDR差别小结

## □峰值亮度

■ SDR: 100尼特（标准），HLG: 1000尼特（标准），PQ: 10000尼特（最高）

## □量化比特

■ SDR: 8比特，HLG: 10比特，PQ: 10-12比特（峰值亮度大于4000尼特时需要12比特）

## □伽玛曲线

■ HLG与SDR的OETF拍摄伽玛差别不太大，因此SDR电视机能够兼容显示HLG图像

■ HLG与SDR的EOTF显示伽玛差别非常大，只有用HLG电视机才能充分发挥HDR的优点

■ HLG与SDR的OOTF都是1.2

➤ 两种伽玛显示的图像对比度和彩色饱和度都比实际场景高一些，显示图像比实际场景更漂亮

## □资源分配（使用超白电平时）

■ 拍摄： SDR的98%电平资源用于SDR内容，11%电平用于高光的HDR

HLG（HDR）的75%电平资源用于SDR内容，34%电平用于高光的HDR

■ 显示： SDR的77%亮度资源用于SDR内容，23%亮度用于高光的HDR

HLG（HDR）的20%亮度资源用于SDR内容，80%亮度用于高光的HDR

■ HLG使用超白电平后，高光HDR能够再增加81%亮度，达到1808尼特

## □与SDR电视相比，可以说HLG是“改良（Evolution）”，PQ是“革命（Revolution）”

色域 (Color Gamut)

# 常用色域

## □ 与设备有关的显示色域（物理色域）

### ■ 电视

- NTSC、EBU、SMPTE C、BT.709、BT.2020

### ■ 电影

- DCI-P3

### ■ IT

- Adobe RGB、sRGB

## □ 与设备无关的色域

### ■ 只用于传输和制作流程

- XYZ、ACES

# NTSC, Adobe RGB

## □ 1953年美国FCC发布NTSC标准，定义了NTSC色域

- 采用CIE的C光源作为基准白

- 参考电影放映拷贝色域定义了NTSC色域范围

- 可再现47.3%可见光色域（CIE1931xy，下同）

- 依据NTSC色域和C光源定义了NTSC亮度方程

- $Y' = 0.299R' + 0.587G' + 0.114B'$

- 结果：名存实亡

- 符合NTSC色域标准的绿色荧光粉发光效率低，显像管亮度不足

- 较高发光效率绿色荧光粉物理色域比NTSC色域小

- 因显示色域与亮度无法同时兼顾，很快被更高发光效率荧光粉的EBU和SMPTE C色域取代

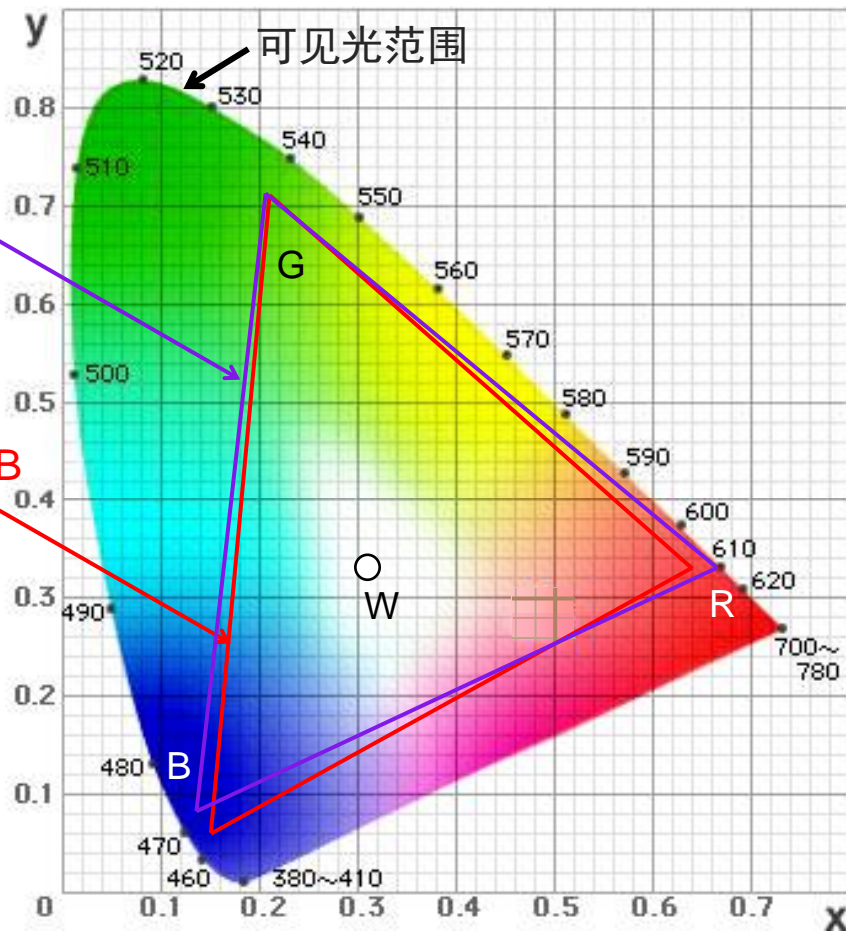
- NTSC色域成为显示行业的参考基准：以NTSC色域作为100%定义了“彩色再现率”

## □ 1998年Adobe发布Adobe RGB色域

- 与NTSC色域几乎相同（G基色相同），可再现45.2%可见光色域

- 用于计算机显示器、打印机、印刷行业

# NTSC, Adobe RGB



电视色域 NTSC

早期彩色电视色域 (参考电影放映拷贝色域定义的宽色域)

计算机显示器色域 Adobe RGB

R/B与BT.709相同, G与NTSC相同 (参考NTSC色域定义的宽色域)

	NTSC		Adobe RGB	
	x	y	x	y
R	0.670	0.330	0.6400	0.3300
G	0.210	0.710	0.2100	0.7100
B	0.140	0.080	0.1500	0.0600
W	0.310	0.316	0.3127	0.3290

# EBU, SMPTE C

## □ 1966年EBU发布PAL标准

- 采用CIE的D光源（D65）为基准白
- 定义了EBU（PAL）色域（窄色域）

## □ 1968年RCA/Conrac发布SMPTE C色域

- 采用CIE的D光源（D65）为基准白
- 定义了SMPTE C广播监视器色域（窄色域）

## □ EBU和SMPTE C色域都是基于高发光效率荧光粉性能制定的，色域范围相近

- 符合这两种标准的荧光粉发光效率能够满足显像管的亮度要求（大于100尼特）
- 可再现33.5%可见光色域，比NTSC小，以NTSC为基准的彩色再现率72%（色域覆盖率为NTSC的72%）

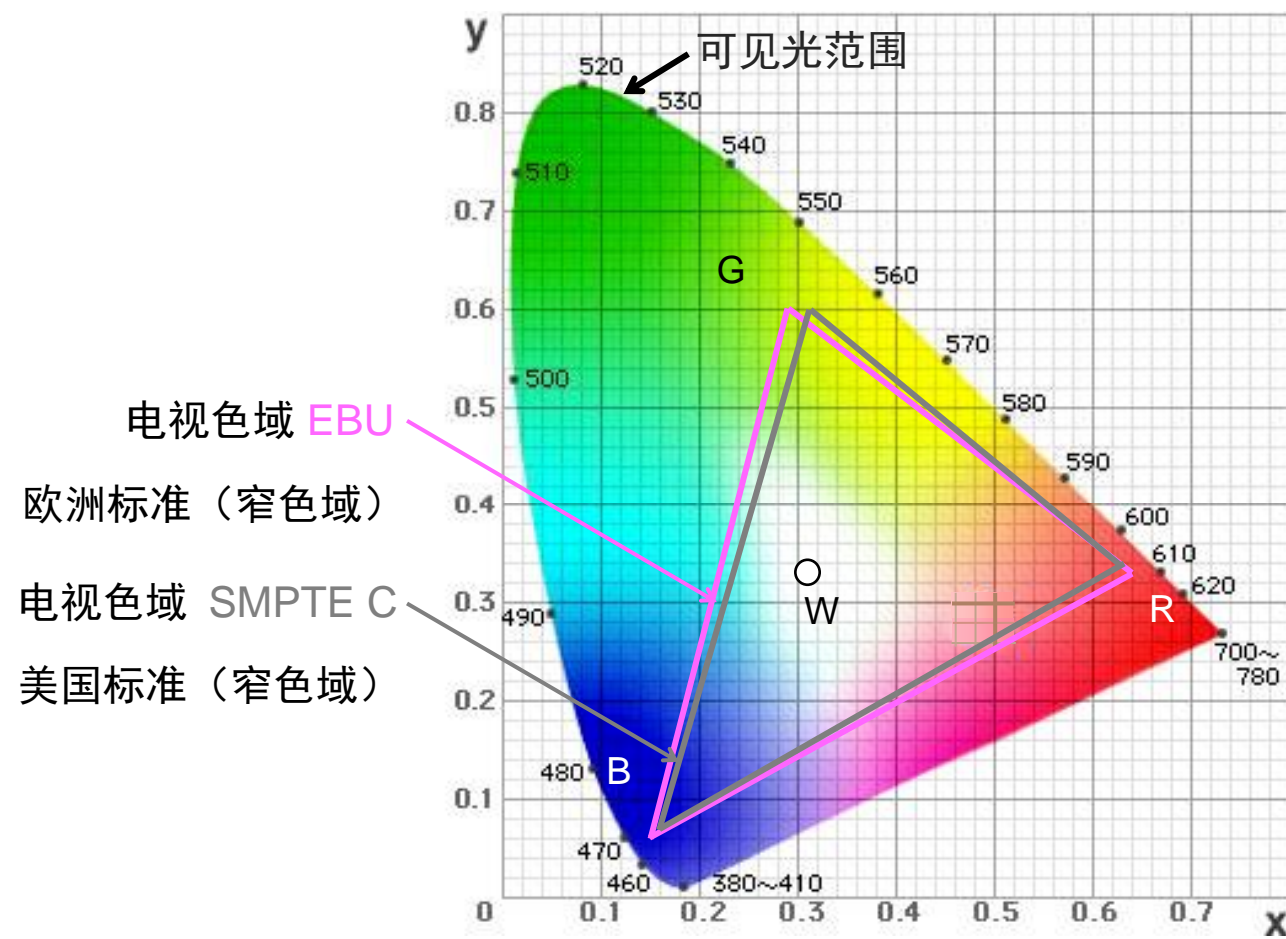
## □ EBU和SMPTE C色域被ITU-R BT.601标准采纳

- EBU和SMPTE C色域分别作为625和525行电视的色域成为ITU-R BT.601标清数字电视技术标准
- 两者都被称为BT.601色域

## □ 亮度方程误差

- BT.601色域比NTSC小，基准白也不同，应依据BT.601色域和D65基准白定义新的亮度方程
  - 以EBU色域和D65基准白定义的亮度方程应为 $Y' = 0.2126R' + 0.7152G' + 0.0722B'$ ，与之后的BT.709高清亮度方程相同
  - 但NTSC亮度方程已经在电视行业广泛使用无法更改，在BT.601中只能继续沿用
  - 在标清电视时代色域和基准白是BT.601，但亮度方程却是NTSC
  - 用NTSC亮度方程运算解析EBU色域和D65基准白得到的RGB基色会出现误差，这个问题一直到高清才得以纠正

# EBU, SMPTE C



	EBU		SMPTE C	
	x	y	x	y
R	0.640	0.330	0.630	0.340
G	0.290	0.600	0.310	0.595
B	0.150	0.060	0.155	0.070
W	0.3127	0.3290	0.3127	0.3290

# BT.709, sRGB

## □ 1990年ITU发布ITU-R BT.709高清电视标准

- 采用CIE的D光源（D65）为基准白
- 定义了ITU-R BT.709色域
- 与BT.601色域一样，BT.709色域也是基于高发光效率荧光粉性能制定的，其色域与BT.601（EBU/625）几乎相同
- 可再现33.5%可见光色域，以NTSC为基准的彩色再现率72%
- BT.709色域的R、B与EBU相同，G的y与EBU相同，x为0.30，是EBU x值0.29与SMPTE C x值0.31的中间值，因此可以把BT.709与EBU视为相同的色域

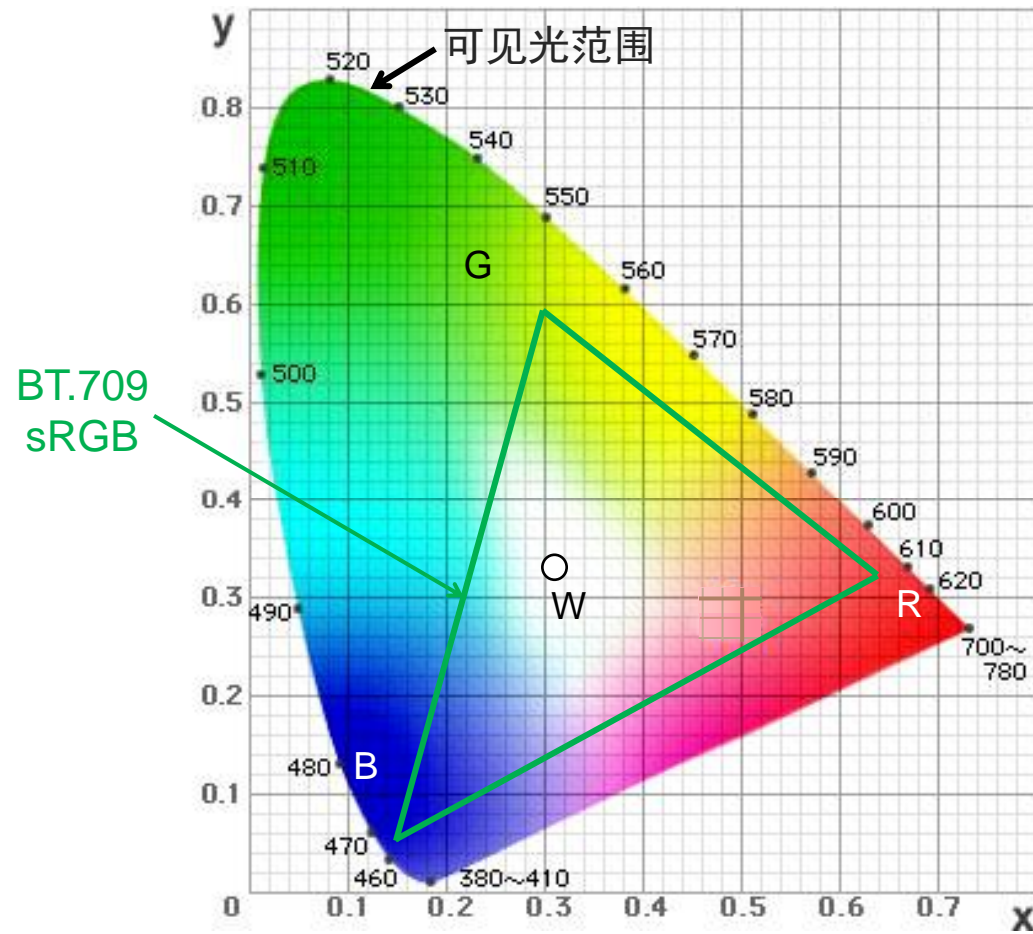
## □ 1996年惠普和微软发布sRGB标准

- 直接采用BT.709技术标准，色域与BT.709完全相同
- 主要用于计算机显示器、打印机、印刷行业
- 目前平板电脑、手机等设备也大多采用sRGB色域
- sRGB标志着计算机行业全面采用了电视行业标准，不同行业的显示技术标准加速融合

## □ 依据BT.709色域和D65基准白定义了BT.709亮度方程

- $Y' = 0.2126R' + 0.7152G' + 0.0722B'$ ，这个亮度方程本来应该与BT.601相同

# BT.709, sRGB



	BT.709		sRGB	
	x	y	x	y
R	0.640	0.330	0.640	0.330
G	0.300	0.600	0.300	0.600
B	0.150	0.060	0.150	0.060
W	0.3127	0.3290	0.3127	0.3290

# DCI-P3, BT.2020

## □ 2005年DCI正式发布V1.0文件

### ■ 参考电影放映拷贝色域定义了DCI-P3数字放映机色域

- 可再现45.5%可见光色域
- 与NTSC、Adobe RGB一样，都是“宽色域”

## □ 2012年ITU发布ITU-R BT.2020标准

### ■ 采用CIE的D光源（D65）为基准白

### ■ 定义了BT.2020色域

### ■ 不再以显像管荧光粉性能作为制定标准的依据，参考了新型显示器件（如LCD、OLED、激光等）性能

### ■ 可再现63.3%可见光色域

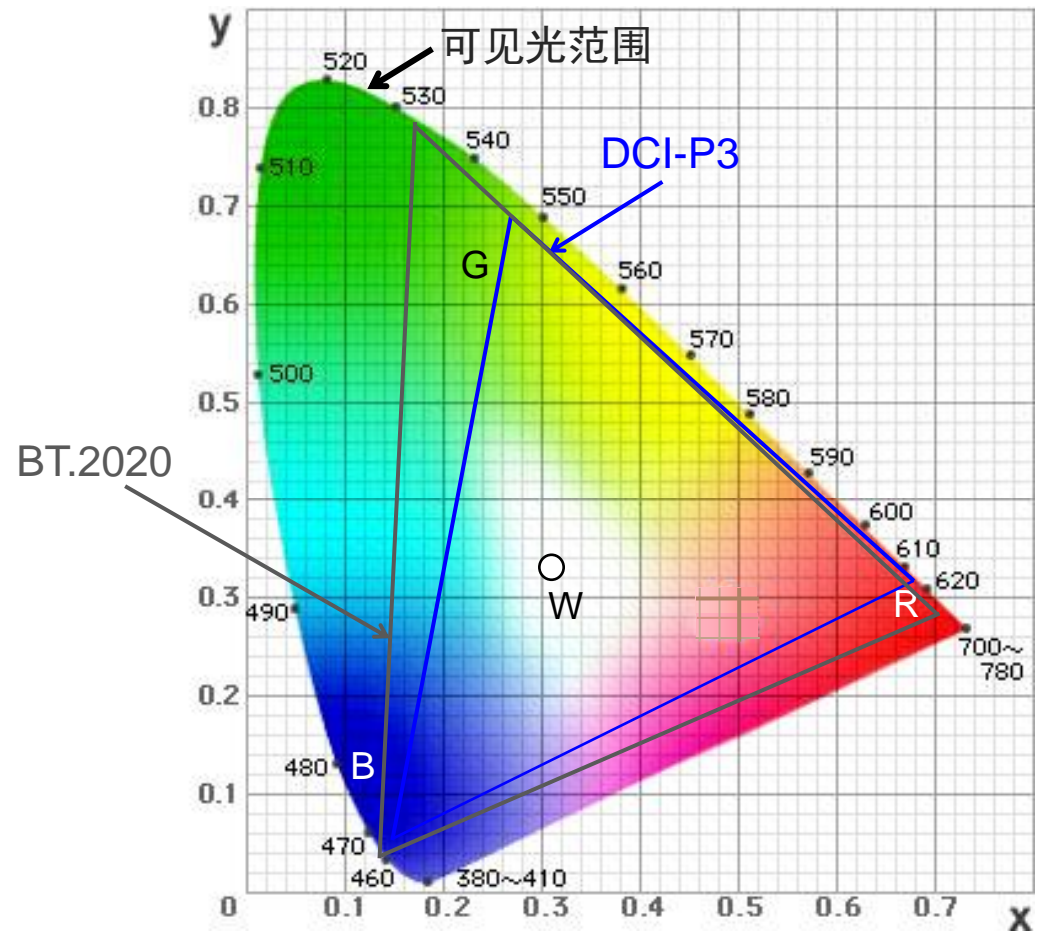
### ■ 是目前显示设备的最宽色域

## □ 依据BT.2020色域和D65基准白，ITU定义了BT.2020亮度方程

### ■ $Y' = 0.2627R' + 0.6780G' + 0.0593B'$

## □ DCI-P3采用RGB制作、传输，无需亮度方程

# DCI-P3, BT.2020



	DCI-P3		BT.2020	
	x	y	x	Y
R	0.680	0.320	0.708	0.292
G	0.265	0.690	0.170	0.797
B	0.150	0.060	0.131	0.046
W	0.314	0.351	0.3127	0.3290

# XYZ, ACES

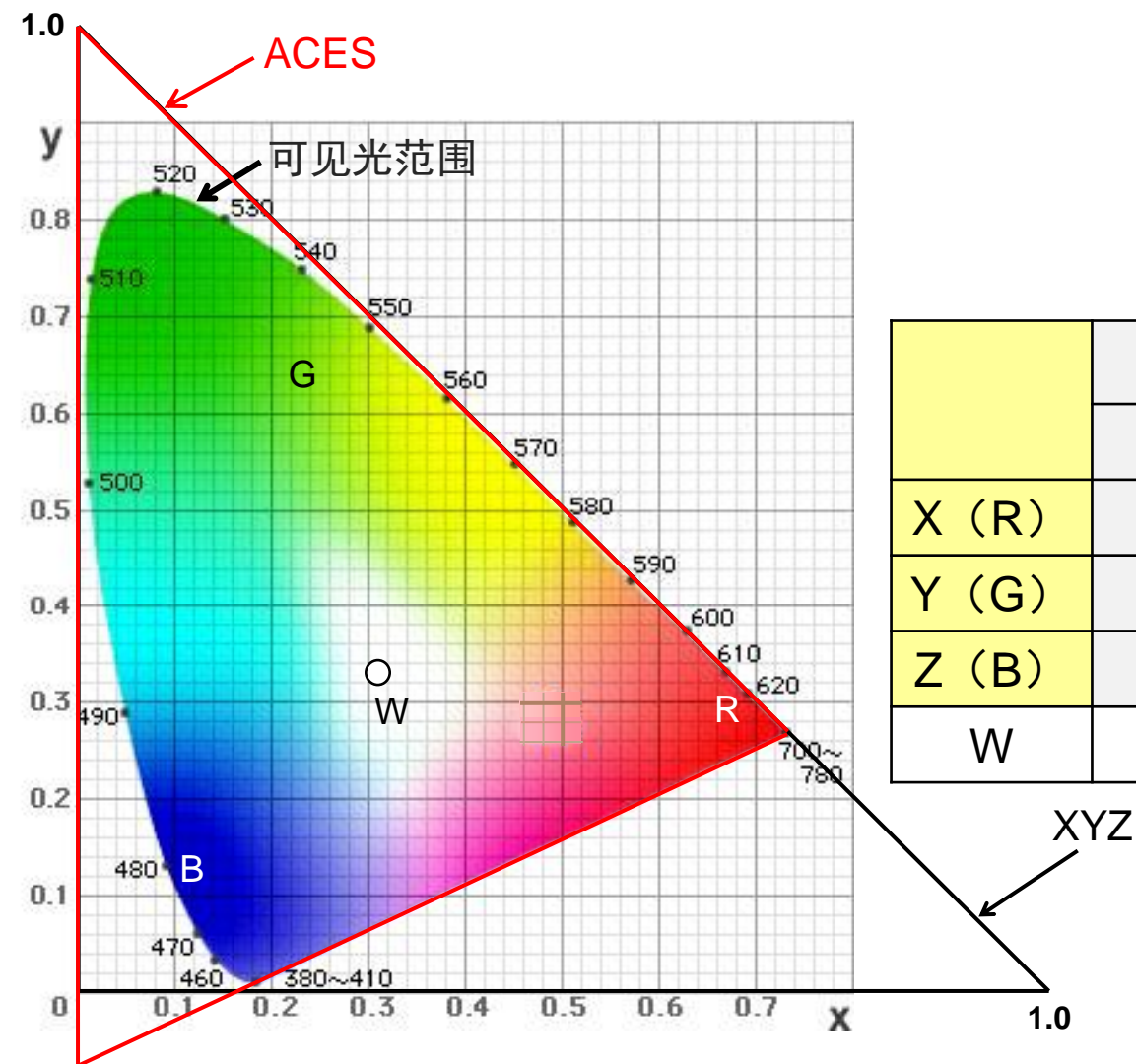
## □ 物理色域

- NTSC、Adobe RGB、BT.709/sRGB、DCI-P3、BT.2020都是与设备有关的显示色域
- 显示色域都比人眼可见色域小，在显示色域的空间中无法制作出超过显示色域的彩色

## □ 制作、传输色域

- 在制作与传输流程中，还使用一些与设备无关、覆盖范围大于人眼可见色域的空间，其典型代表是XYZ与ACES色域
- XYZ
  - DCDM（Digital Cinema Distribution Master，数字影院发行母版）和DCP（Digital Cinema Package，数字影院发行拷贝）色域，DCI文件/SMPTE 428-1规定的DCDM和DCP制作/传输色域，理想化的直角坐标系，覆盖范围最大
  - 与BT.709/2020相比彩色矢量差比较大，空间资源利用率低
- ACES
  - ACES（Academy Color Encoding System，学院彩色编码系统）色域，美国电影艺术与科学学院提出的制作色域
  - 比XYZ色域覆盖范围小但大于人眼可见色域
  - 已经得到主流非线性制作设备厂商的支持
  - 与BT.709/2020相比彩色矢量差比较小，空间资源利用率比XYZ高
- 制作、传输色域的空间大于可见色域，可以制作出超过显示色域的彩色，制作流程中不会损失彩色信息
- 制作、传输色域相当于容器，只用于制作、传输，不能完全显示

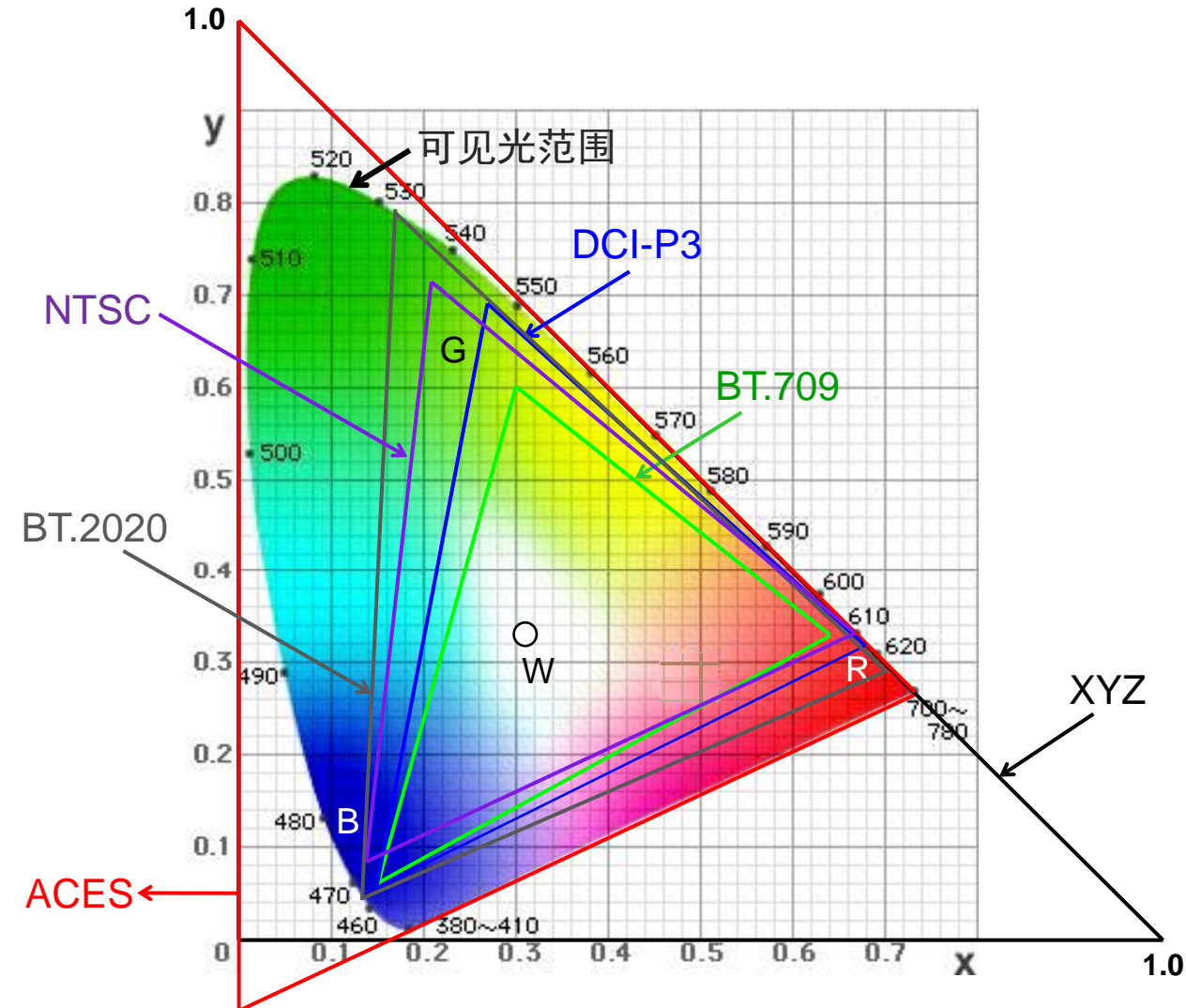
# XYZ, ACES



	XYZ		ACES	
	x	y	x	y
X (R)	1	0	0.7347	0.2653
Y (G)	0	1	0.0000	1.0000
Z (B)	0	0	0.0001	-0.0770
W			0.3127	0.3290

# 色域比较

	BT.709 (高清)		DCI-P3 (电影)		NTSC		BT.2020(超高清)		ACES		XYZ	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
R	0.640	0.330	0.680	0.320	0.670	0.330	0.708	0.292	0.7347	0.2653	1	0
G	0.300	0.600	0.265	0.690	0.210	0.710	0.170	0.797	0.0000	1.0000	0	1
B	0.150	0.060	0.150	0.060	0.140	0.080	0.131	0.046	0.0001	-0.0770	0	0
W	0.3127	0.3290	0.314	0.351	0.310	0.316	0.3127	0.3290	0.32168	0.33767		



# 色域匹配

□ 拍摄/制作色域必须与显示色域一致才能正确还原被摄物的彩色

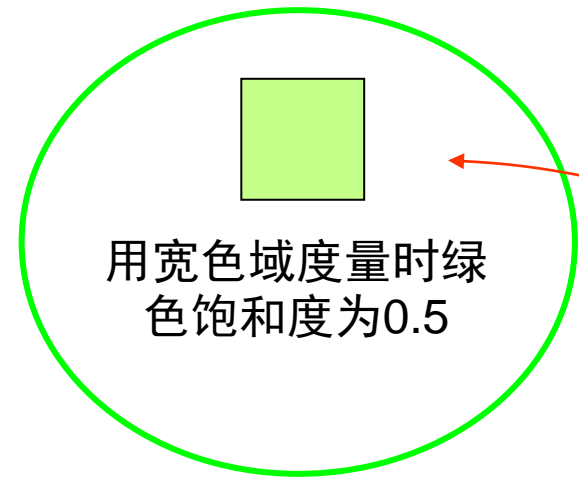
■ 拍摄/制作色域与显示色域不同时还原的彩色就会出现色调或色饱和度失真

- 显示色域比拍摄色域小时直接的表现就是显示的彩色饱和度比实际景物彩色饱和度低
- 显示色域比拍摄色域大时显示的彩色饱和度比实际景物彩色饱和度高
- 只有拍摄与显示色域相同时显示的彩色饱和度才与实际景物的彩色饱和度相同
- 由于不同色域的基色点位置不同，同样的彩色在不同色域中的色调也有差别

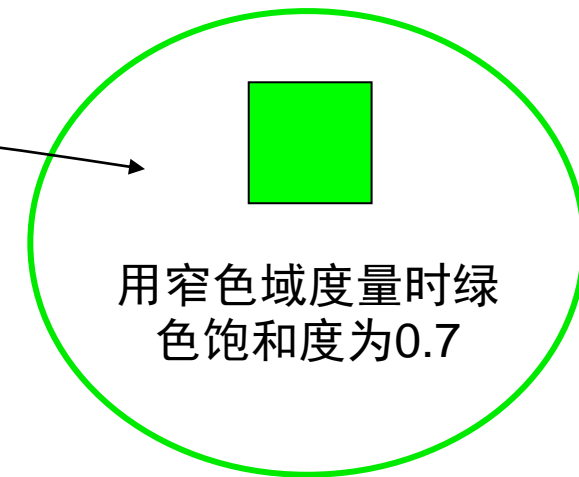
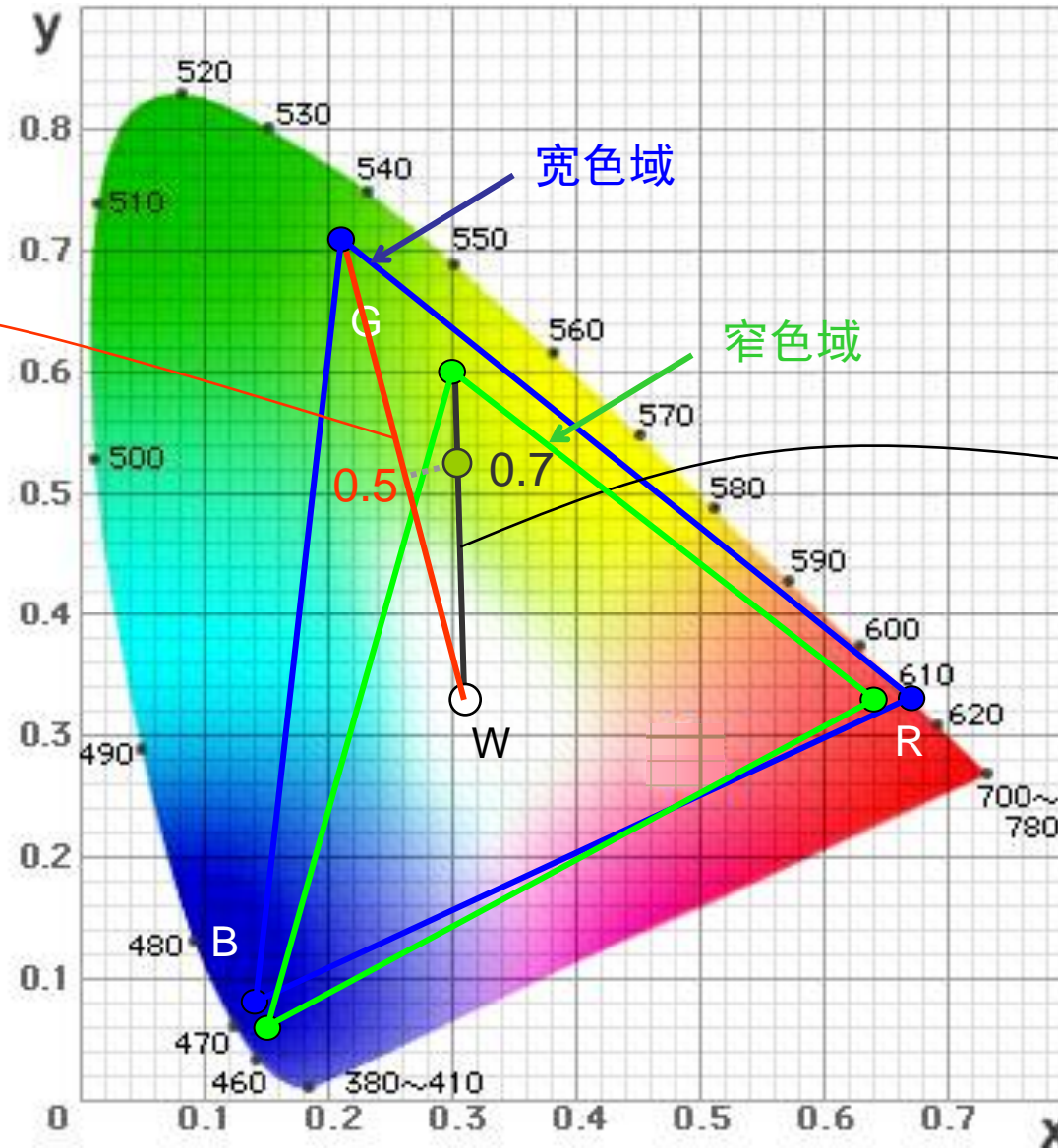
■ 色域相当于度量的标尺

- 拍摄和显示时使用相同的标尺度量彩色时才能得到相同的数值
- 相同的彩色用不同刻度的标尺度量时得到的数值是不同的

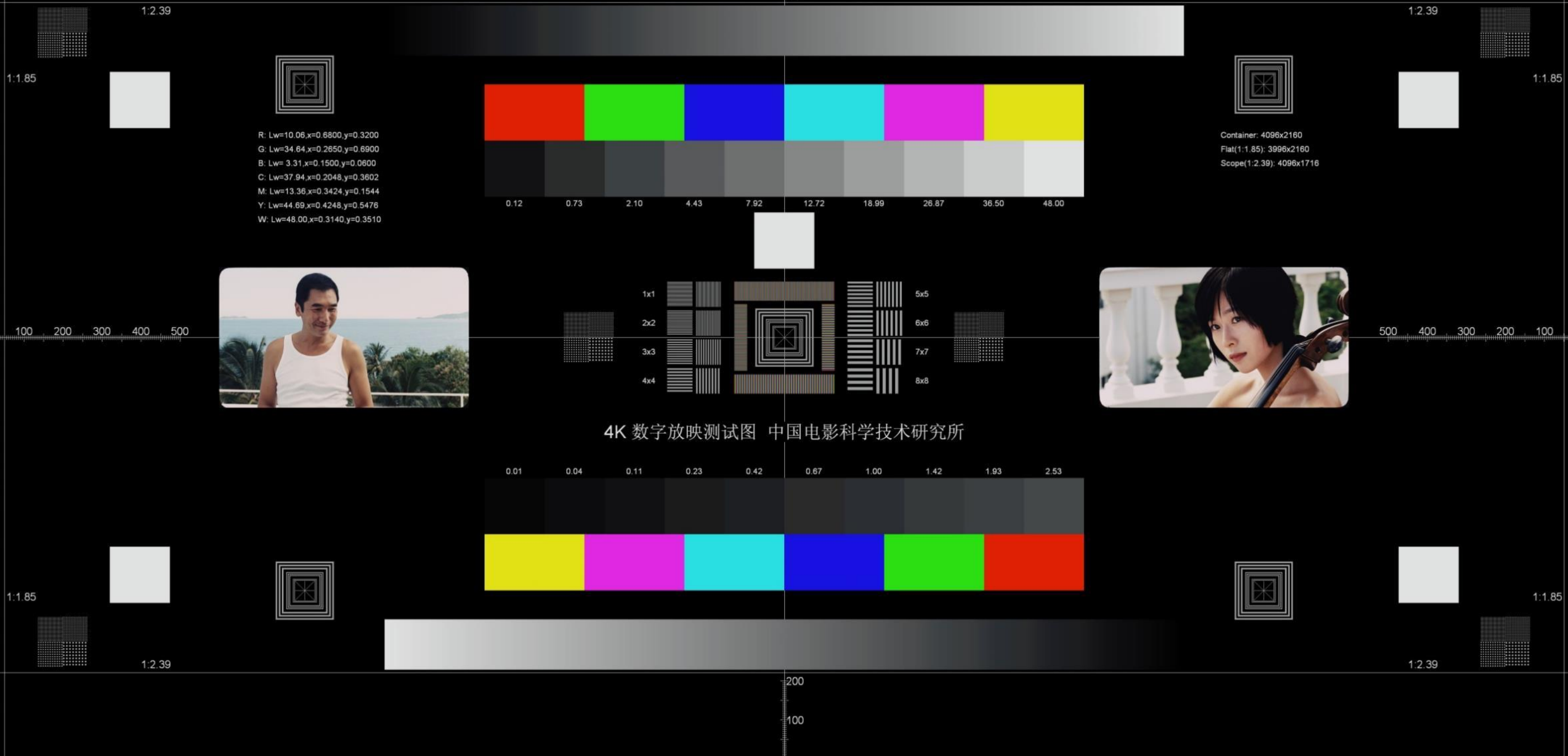
# 色域匹配



由于不同色域的基色点位置不同，同样的彩色在不同色域中色饱和度不同，色调也有差别



# DCI-P3色域监视器显示DCI-P3色域图像（正常）



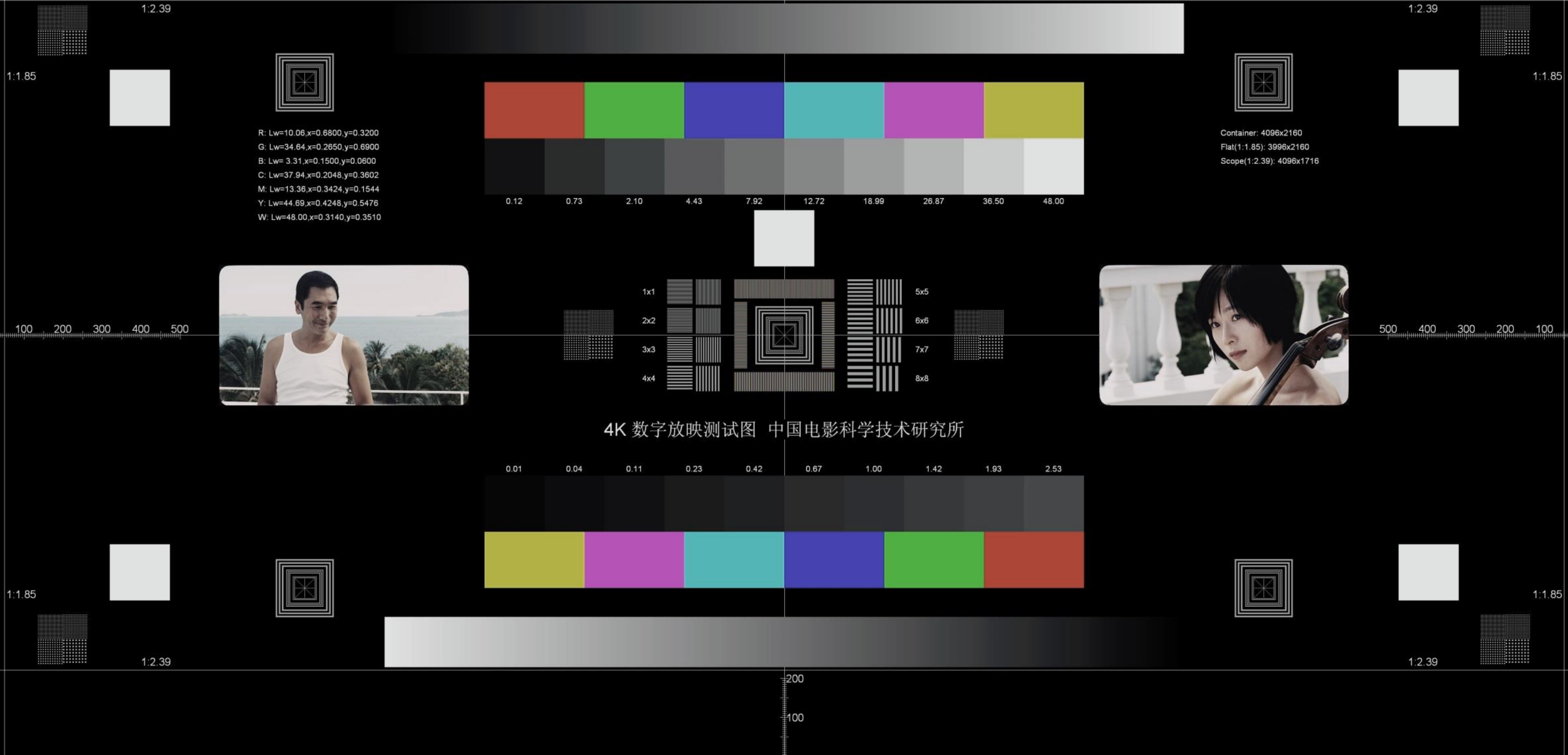
R: Lw=10.06,x=0.6800,y=0.3200  
G: Lw=34.64,x=0.2850,y=0.6900  
B: Lw= 3.31,x=0.1500,y=0.0600  
C: Lw=37.94,x=0.2048,y=0.3602  
M: Lw=13.36,x=0.3424,y=0.1544  
Y: Lw=44.69,x=0.4248,y=0.5476  
W: Lw=48.00,x=0.3140,y=0.3510

Container: 4096x2160  
Flat(1:1.85): 3996x2160  
Scope(1:2.39): 4096x1716

4K 数字放映测试图 中国电影科学技术研究所

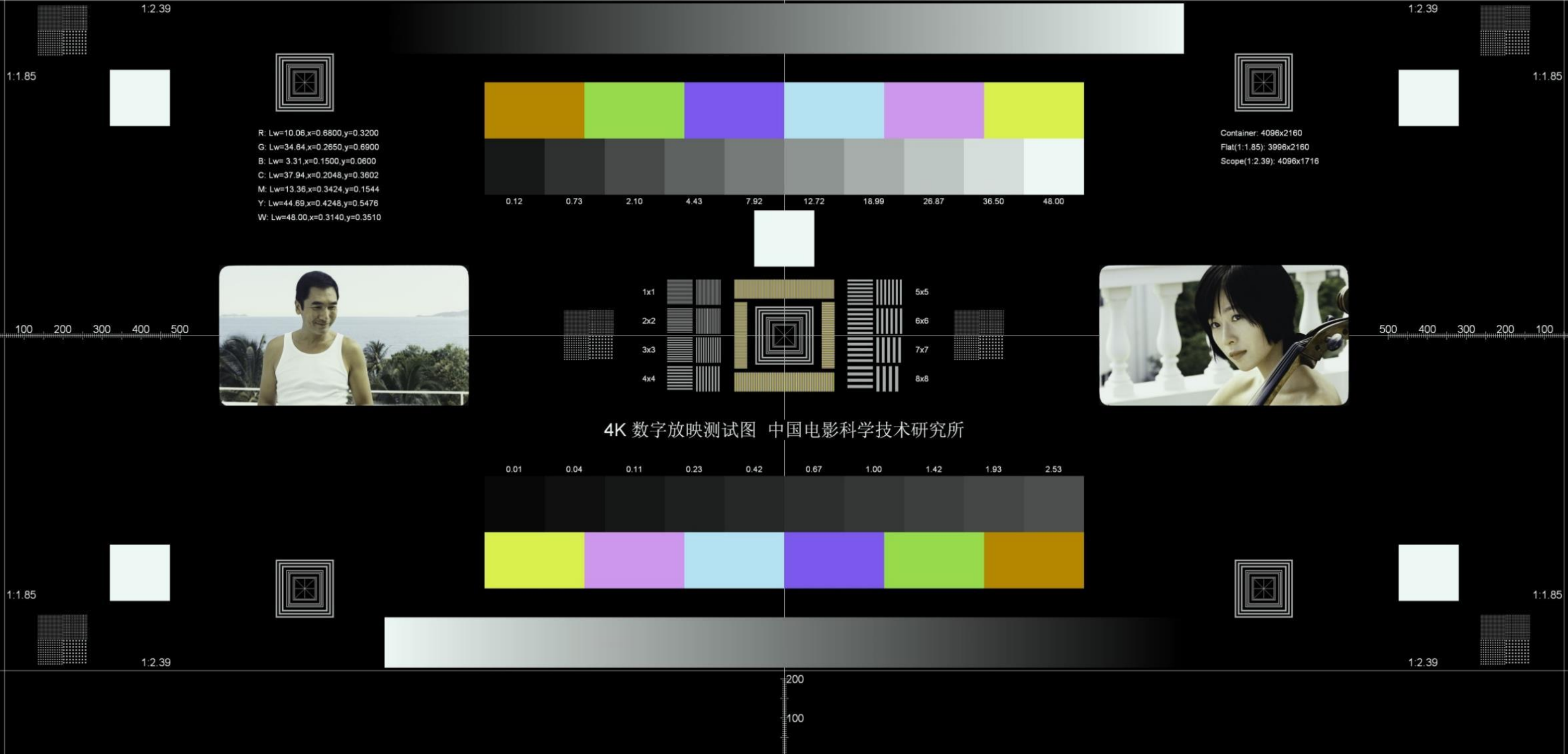
0.01 0.04 0.11 0.23 0.42 0.67 1.00 1.42 1.93 2.53

# DCI-P3色域监视器显示BT.2020色域图像（色调不变，饱和度降低）



4K 数字放映测试图 中国电影科学技术研究所

# DCI-P3色域监视器显示XYZ色域图像 (色调改变, 饱和度降低)



# 色域转换

## □ 色域转换就是坐标系转换

- 窄色域转宽色域也称上转换，例如BT.709转BT.2020，就是把用709坐标系标定的信号改为用2020坐标系标定，可参考BT.2087
  - 由于709的空间小于2020，经过转换后709的所有信息都在2020的空间内，所以上转换是可逆的无损处理，不会损失彩色信息，但转换后的坐标值会变小
- 宽色域转窄色域也称下转换，例如BT.2020转BT.709，就是把用2020坐标系标定的信号改为用709坐标系标定，可参考BT.2407
  - 由于2020的空间大于709，经过转换后只有709空间内的彩色信息能够保留，709空间之外的彩色信息丢失，从信息量的角度看下转换是不可逆的有损处理
  - 下转换时对超过BT.709色域的彩色信息也有硬削波或软削波两种处理方法，硬削波完全损失了宽色域的信息，软削波用较少资源保留了部分宽色域信息，与电视伽玛“拐点”对高亮度信息的处理相似

## □ 可以用3D LUT实现色域转换

- 优点：方便
- 缺点：精度不如矩阵运算的坐标系转换高

# 小结

□ 模拟时代，在信号域对色域进行精确校正非常困难、麻烦

■ 必须根据显示器件的物理特性制定拍摄色域标准

■ 拍摄、制作色域必须与显示色域一致

□ 数字技术提高了在信号域校正色域的精度，降低了难度和成本

■ 制定色域标准时可以不考虑显示器件的物理性能，把色域作为容器

➤ 尽管几乎所有直接显示器件都不能完全覆盖BT.2020色域，但制作时仍然可以把BT.2020当作色域容器使用

■ 显示器件物理色域大于使用色域时可以用大色域精确模拟小色域，物理色域小于使用色域时只能在小色域范围内精确模拟大色域，超出的部分无法准确再现

□ 不同色域，实际上就是不同的空间坐标系

■ 同一种彩色在不同坐标系里的坐标值是不一样的

➤ 只有拍摄/制作与显示色域相同，也就是坐标系相同时，才能正确还原被摄物的彩色

□ 色域大小与数据量无关

■ 数据量与量化比特有关，与色域无关

空间 (Space)

# 在影视制作行业，空间（Space）的概念并没有严格定义

□空间，通常是指拍摄、制作和显示的色域、伽玛、亮度

■拍摄或成品节目（母版）的空间与显示空间匹配时才能正确再现被摄景物的对比度和彩色

□在某些场合，空间表达的是色域

■例如BT.709、DCI-P3、BT.2020、XYZ、ACES彩色空间等

□有时是伽玛

■例如线性空间（电影行业说的“线性空间”实际上是电视伽玛）、对数空间等

□有时是色域+伽玛

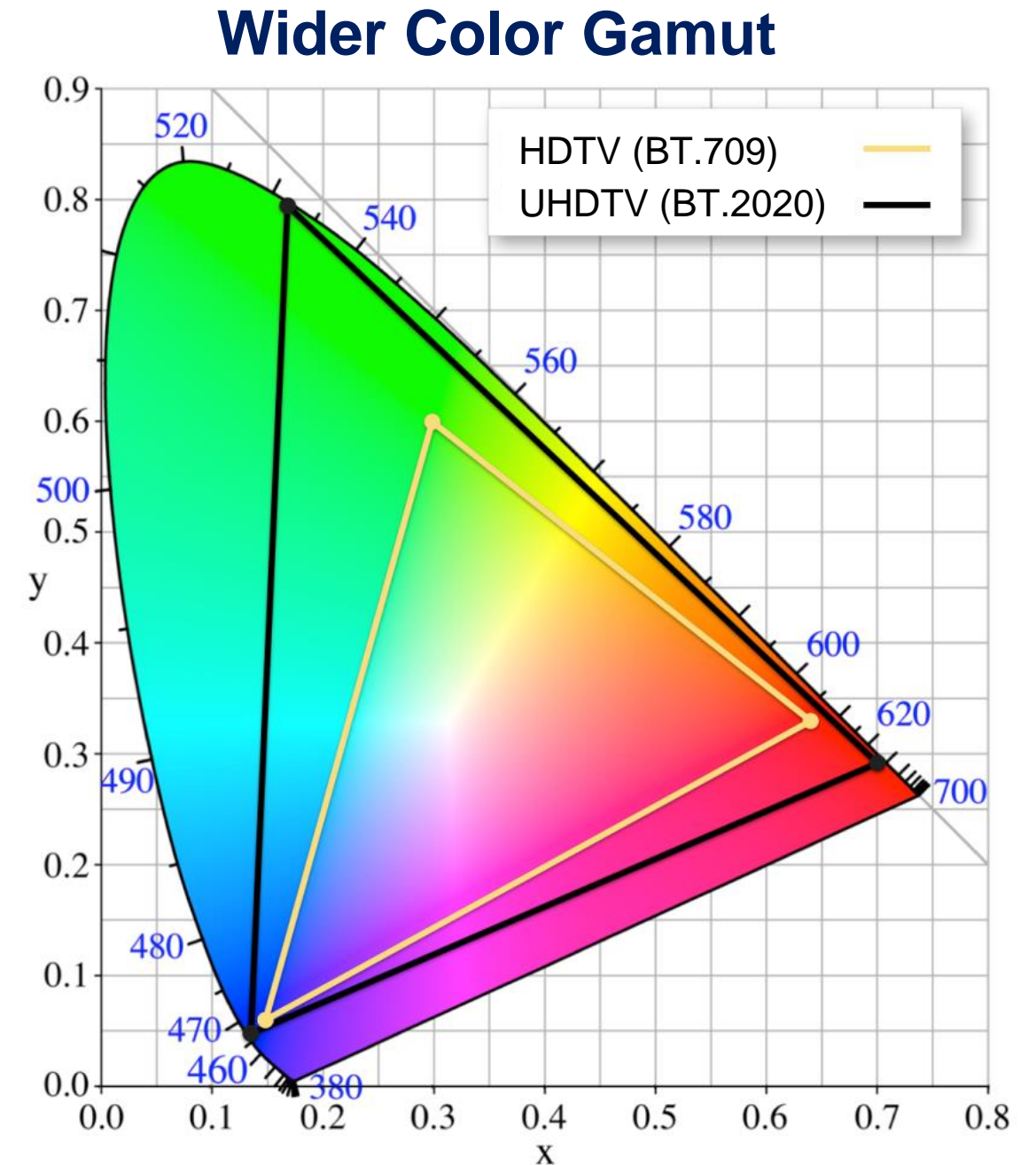
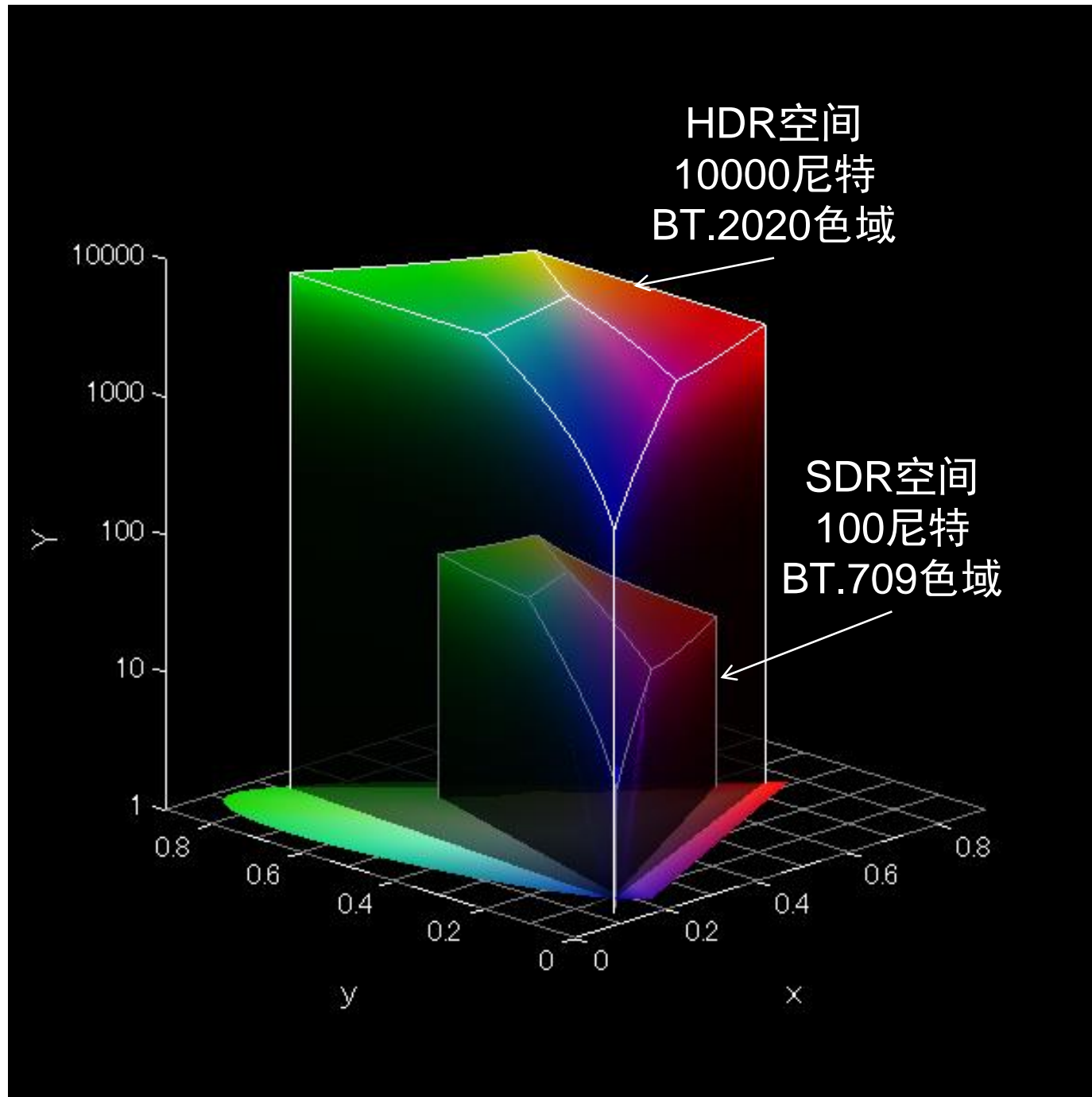
■如DCI-P3色域+DCI伽玛，XYZ色域+DCI伽玛，BT.709色域+BT.1886伽玛，BT.2020色域+HLG伽玛，BT.2020色域+PQ伽玛，ACES色域+线性伽玛等

□有时是色域+伽玛+峰值亮度

■如BT.2020+PQ4000，BT.2020+HLG1000等

□继续细分，还可以把RGB和YUV（ $Y C_B C_R$ ）也看作不同的空间

# 空间：色域+亮度（Color Volume, 彩色容量）



# 制作流程与空间

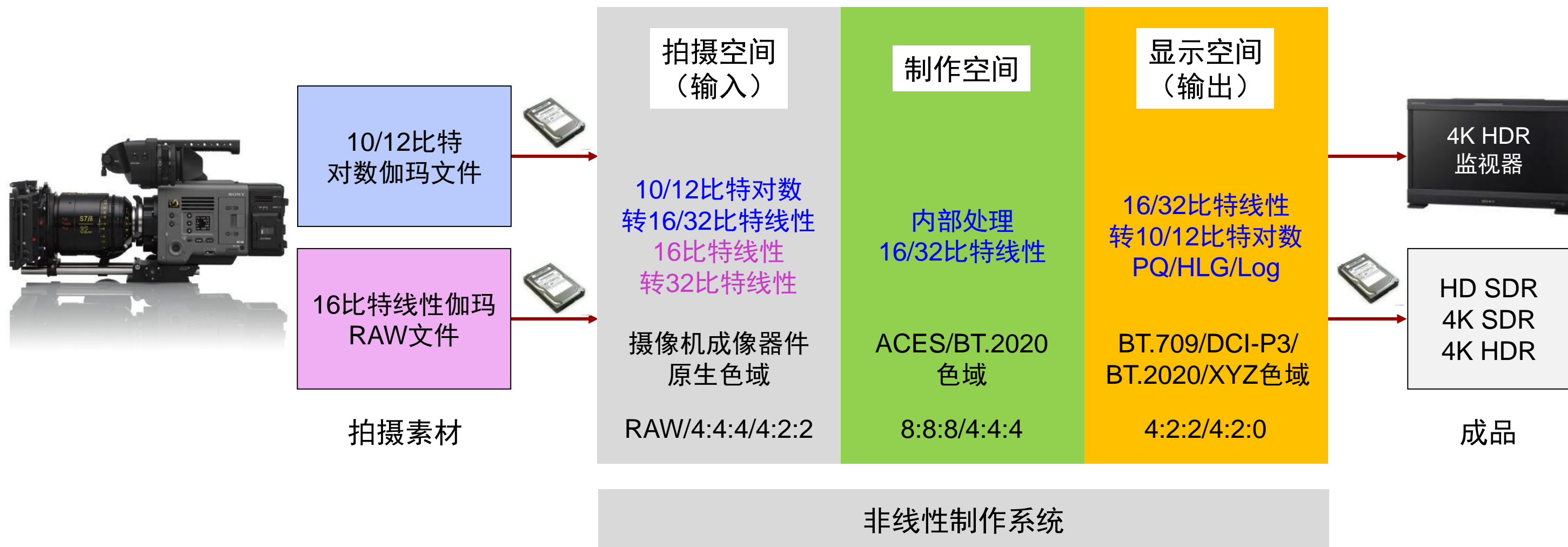
## □ 实时直播

- “所见即所得”的直播流程（包括不调色的录播流程）不改变亮度和彩色空间
- 拍摄、制作与显示空间相同

## □ 非实时调色录播

- 在“所见非所得”的调色录播流程中，拍摄、制作和显示空间是不同的
  - 拍摄：成像器件原生色域+线性或对数伽玛
  - 制作：宽色域+线性伽玛
  - 显示：行业标准推荐的显示空间，如SDR（BT.1886伽玛+BT.709色域）、HDR（HLG EOTF+BT.2020色域，PQ EOTF+P3色域）
  - 关系：可以把拍摄空间看成米，制作空间看成锅，输出的显示空间是大小不同的碗，调色时制作空间这口锅必须足够大，即分辨率、量化比特和色域都要比米多比碗大，才能确保制作流程中不损失亮度和彩色的有效信息
- 只有在后期制作的调色阶段，对调色师来说是“所见即所得”

# 非实时录播制作流程中不同的空间

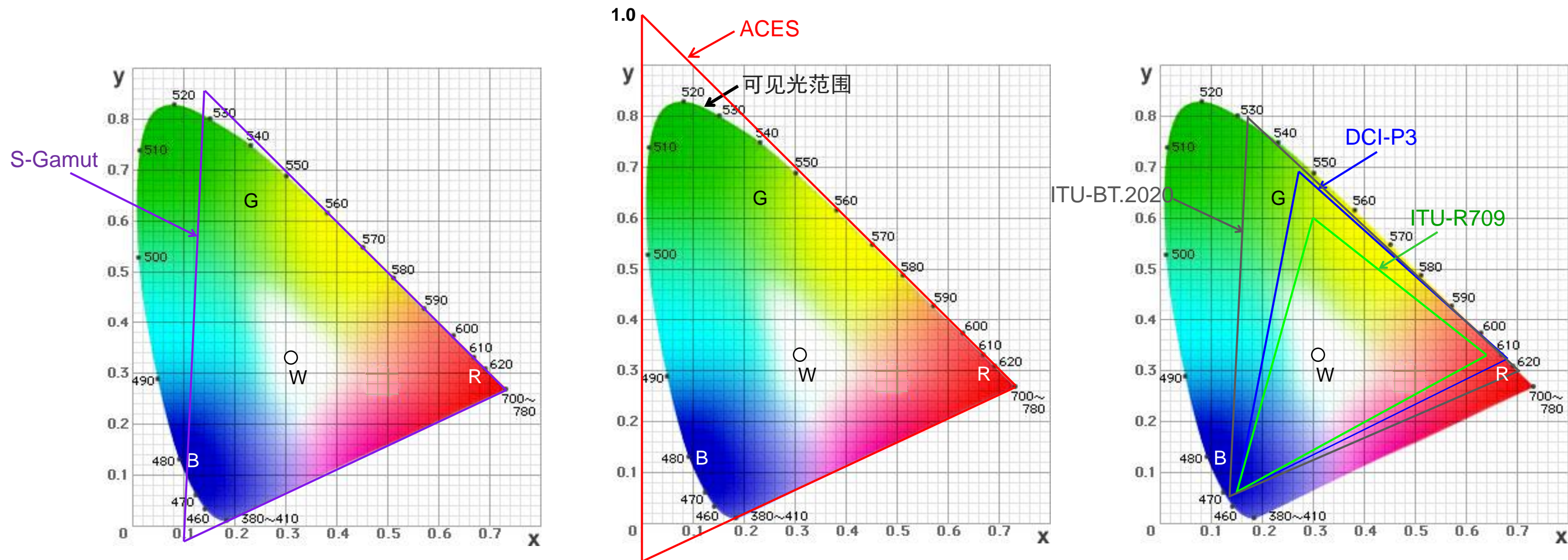


# 空间比较（色域）

输入空间（素材）

制作空间（时间线）

输出空间（成品）



素材是米，制作空间是锅，输出（显示）空间是碗

# HDR制作

# 摄像机

## □支持HDR拍摄

### ■高动态范围

- 电视行业-相对概念：动态范围大于600%
- 电影行业-绝对概念：宽容度大于13档光圈

### ■伽玛

#### ➤ 实时直播

- ❖ HLG或PQ
- ❖ 基于Cineon的厂商定义对数伽玛+实时调色或转换器转换成HLG或PQ
  - 如Log C、S-Log3、C-Log、V-Log、RED Log.....等

#### ➤ 非实时录播

- ❖ 不调色：与实时直播相同
- ❖ 调色：16比特线性伽玛原始数据RAW，或12/10比特对数伽玛文件
- ❖ 胶片（彩色负片）特性相当于采用对数伽玛记录素材的数字摄影机（实际上是数字摄影机的设计模拟了彩色负片特性），适用于HDR拍摄
- ❖ 底片扫描的DPX对数文件属于HDR素材范畴，可用于调色制作HDR节目

### ■色域

- 信号色域：BT.2020（电视）或DCI-P3（电影）
- 成像器件物理色域：大于BT.709，最好大于DCI-P3

## □符合上述条件，即使未标注支持HDR的摄影机也适用于HDR拍摄

# 监视器

## □ 监视器的重要性

- 符合行业技术标准、设置正确、经过校准和检测的监视器是制作高质量HDR节目的重要保障
- 很多失败的HDR作品都是用错了监视器或监视器设置不正确造成的

## □ 支持HDR显示

- 峰值亮度400~2000尼特，建议1000尼特
  - 制作PQ时峰值亮度越高越好，1000尼特是下限
- 最低亮度低于0.01尼特
  - 对应黑电平的最低亮度越低越好，0.01尼特是上限
- EOTF支持符合BT.2100标准的PQ、HLG
- 输入信号支持BT.2020色域
  - 也称为“彩色空间”，即传输信息的容器为BT.2020大空间，容纳的彩色信息量比BT.709容器多
- 转换矩阵支持BT.2020
  - 输入YCBCR信号转换为RGB时的矩阵运算
- 显示屏物理色域大于DCI-P3
  - 物理色域越大越好，但目前所有类型的直接显示屏物理色域都达不到BT.2020标准，DCI-P3是下限

# HLG监视器设置

- 根据BT.2408表3设置监视器的显示（系统）伽玛值
- 检查确认峰值亮度与HDR参考白基准亮度
  - 用亮度色度计分别检测100%HLG与75%HLG电平对应的亮度
  - 调整监视器的亮度和对比度使其与表4的亮度值对应
    - 表4左侧是100%HLG电平对应的亮度，右侧为75%HLG电平对应的亮度

表 3

HLG显示伽玛

基准峰值亮度 (cd/m <sup>2</sup> )	显示伽玛
400	1.03
600	1.11
800	1.16
1 000	1.20
1 500	1.27
2 000	1.33

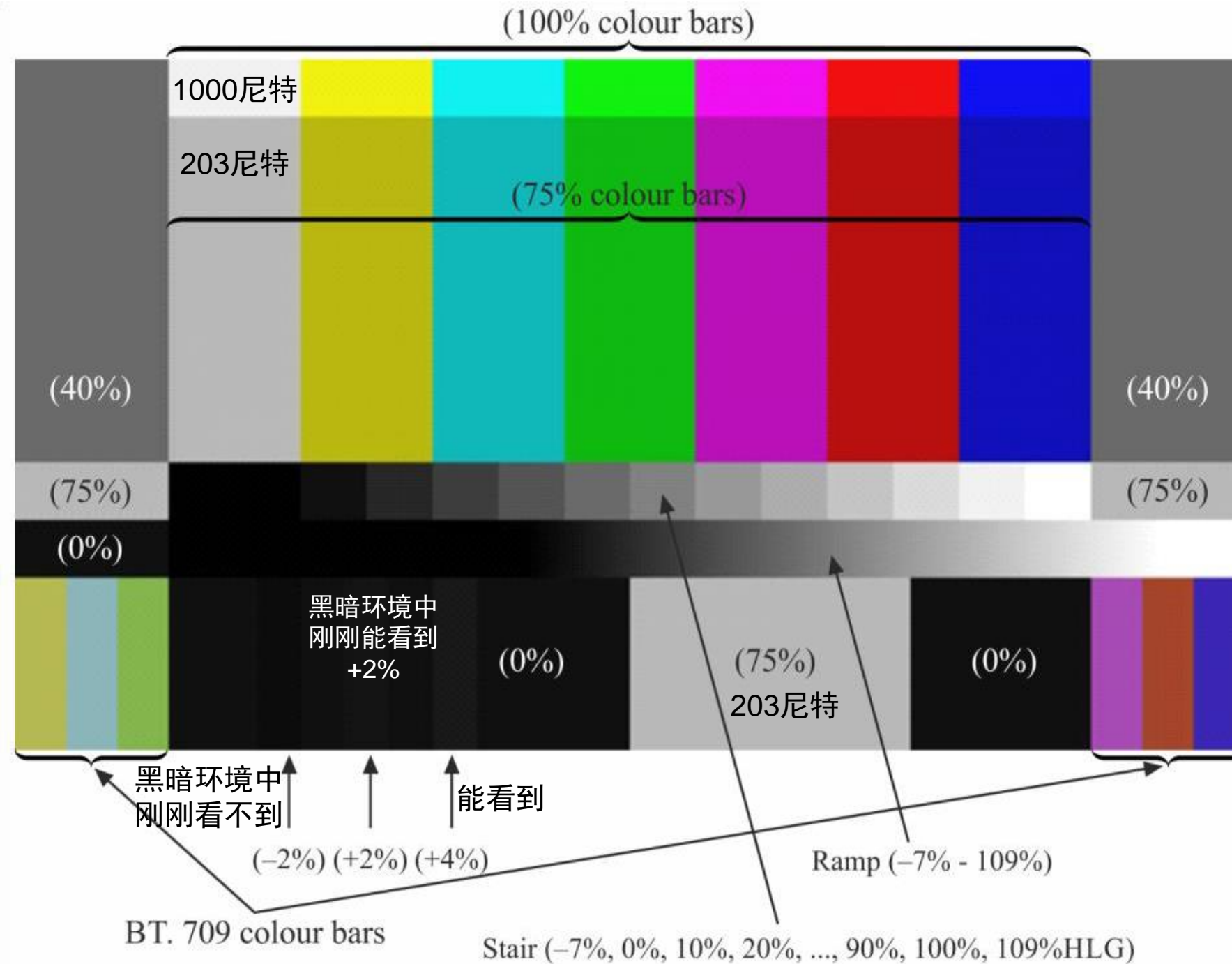
表 4

不同基准峰值显示的测试块亮度级别

基准峰值亮度 (cd/m <sup>2</sup> )	HDR参考白 (cd/m <sup>2</sup> )
400	101
600	138
800	172
1 000	203
1 500	276
2 000	343

# 用BT.2111 HDR测试信号检查监视器

HLG窄域BT.2111测试信号（峰值亮度1000尼特）



# HDR参考白基准

□ BT.2408表1列出了HDR参考白基准亮度与电平

■ HDR参考白基准亮度是HDR制作时监视器的显示亮度基准

- 在1000尼特峰值亮度监视器上，PQ与HLG的HDR参考白基准亮度都是203尼特
- HDR参考白基准亮度是100%动态范围时监视器的显示亮度

■ HDR参考白基准电平是HDR参考白基准亮度对应的信号电平

- PQ与HLG的HDR参考白基准电平分别为58%PQ和75%HLG
- HDR参考白基准电平是拍摄场景光动态范围100%时对应的输出电平

反射对象或参考 (亮度系数, %)	基准亮度, $\text{cd}/\text{m}^2$ (PQ和1000 $\text{cd}/\text{m}^2$ HLG)	基准信号电平	
		%PQ	%HLG
灰度卡 (18%)	26	38	38
灰阶卡最大 (83%)	162	56	71
灰阶卡最大 (90%)	179	57	73
参考电平: HDR参考白 (100%) 亦为漫反射白和图形白	203	58	75

# HDR参考白亮度与电平

□ HDR参考白亮度与电平并不是唯一的，而是根据制作需求确定的

■ 早期HDR制作以SDR监视器峰值白亮度100尼特作为HDR参考白亮度

- 关闭拐点时100%动态范围对应100%SDR电平，SDR监视器显示峰值白亮度100尼特
- 制作实践证明，采用SDR峰值白亮度100尼特作为HDR参考白时亮度过低，制作的HDR图像较暗，不符合观众对HDR的期望

■ BT.2408建议HDR参考白**基准**亮度203尼特

- 由HLG和PQ的EOTF可得到HDR参考白**基准**电平分别为 75%HLG和58%PQ

■ 央视2019年使用的HDR参考白亮度230尼特

- 由HLG的EOTF可得到HDR参考白电平77%HLG

■ SONY美国专业系统集团建议HDR参考白亮度230尼特

- 由HLG的EOTF可得到HDR参考白电平77%HLG

■ 央视2021年使用的HDR参考白亮度260尼特

- 由HLG的EOTF可得到HDR参考白电平79%HLG

■ OBS推荐的HDR参考白亮度260尼特

- 由HLG的EOTF可得到HDR制作参考白电平79%HLG（OBS文档：75%HLG映射90%SDR）

□ HDR参考白电平是HDR与SDR转换时的基准，也是HDR制作时白色字幕的推荐电平

# BT.2408选择203尼特作为HDR参考白基准亮度的原因

## □增加了SDR内容的电平资源

■ 以显示亮度100尼特作为SDR与HDR内容的分界线、峰值亮度1000尼特时

➤ PQ与HLG用于SDR的电平资源分别为51%PQ和63%HLG

■ 在HDR信号中，主要信息都集中在SDR内容里

➤ BT.2408的推荐值58%PQ和75%HLG增加了SDR内容的电平（量化）资源

➤ 提高HDR参考白电平虽然降低了动态范围，但从整体看有助于改善HDR图像的综合质量

## □提高了HDR图像中SDR内容以及SDR上转换内容的亮度

■ HDR参考白基准是HDR图像中SDR内容的最高亮度

➤ HDR参考白基准亮度100尼特时，如果场景中只有SDR内容，用HDR与SDR摄像机同时拍摄，HDR监视器的亮度与SDR监视器一样，都是100尼特

➤ 把SDR素材上转换成HDR时，SDR峰值白映射到HDR参考白电平，在HDR监视器上SDR峰值白显示亮度也是100尼特，与SDR监视器显示SDR素材时相同

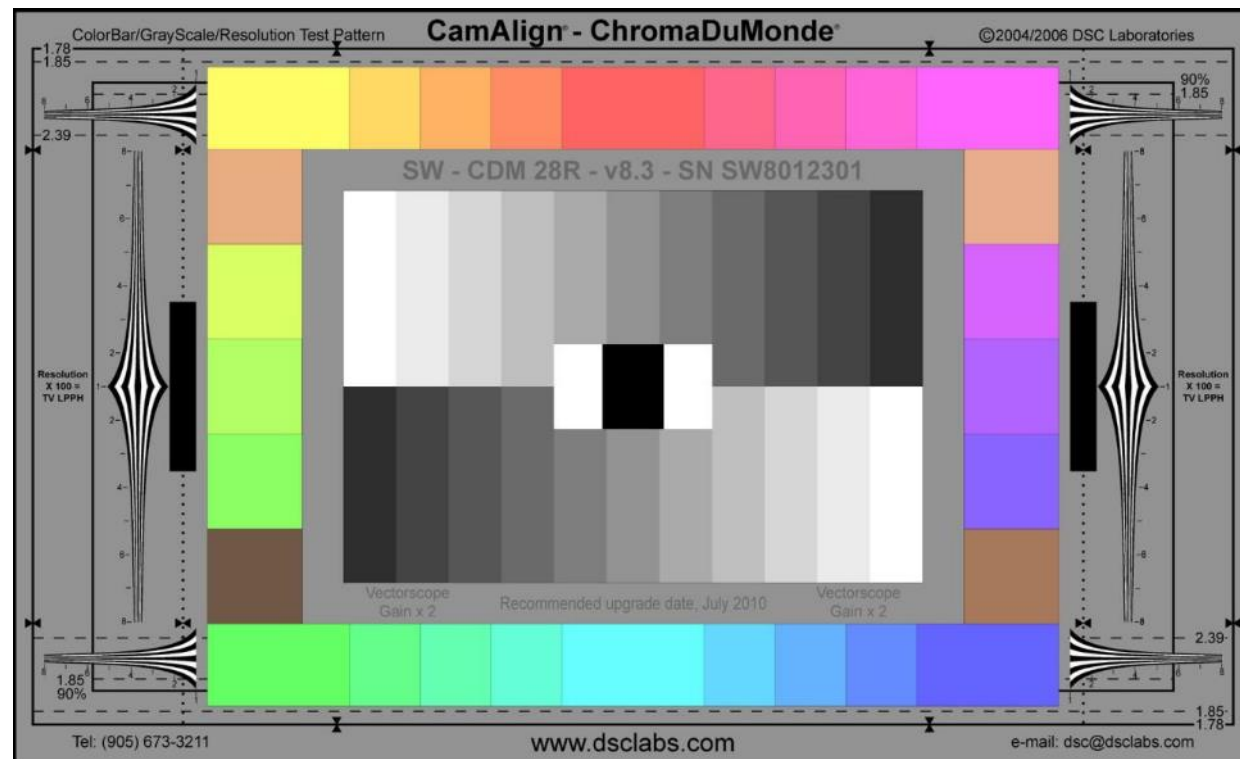
➤ 新型SDR高清电视机的显示亮度比专业监视器高得多，其峰值亮度大多在200尼特以上

➤ HDR参考白亮度为100尼特时，在HDR电视机上显示的SDR内容亮度比新型高清SDR电视机低

➤ HDR图像中的SDR内容以及上转换的SDR内容最高亮度203尼特时，与新型高清电视机相当

# 测试卡

- 定义HDR参考白基准电平时BT.2408建议使用100%反射率白卡
  - 目前市场上没有100%反射率的白卡或包括100%反射率白的灰阶卡产品
  - 可以把90%反射率白卡“当作”100%反射率白卡使用
    - 拍摄时输出电平与照度、被摄物反射率、光圈、曝光时间等因素相关，改变其中的任何一个都会改变输出电平
    - 除非在同一场景中并列拍摄100%与90%反射率白卡，实际操作时可以把90%反射率白卡“归一化”为100%反射率白卡使用

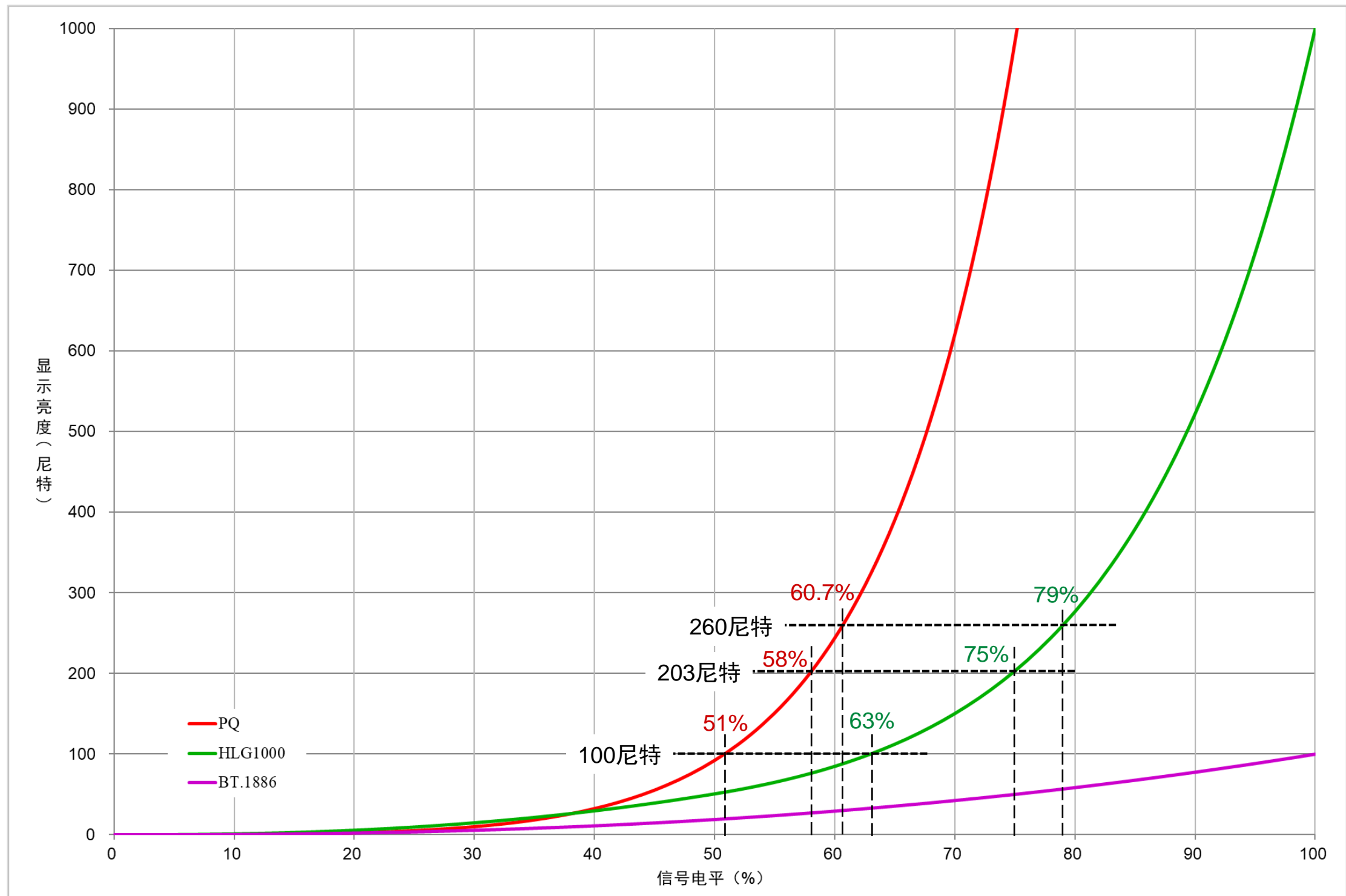


DSC灰度卡



ESSER灰度卡

# HDR参考白亮度与电平



# 实时直播

□目前，HDR直播制作必须兼顾SDR播出的需求

■需要HDR-SDR同步制作

□BT.2408推荐了两种HDR制作流程

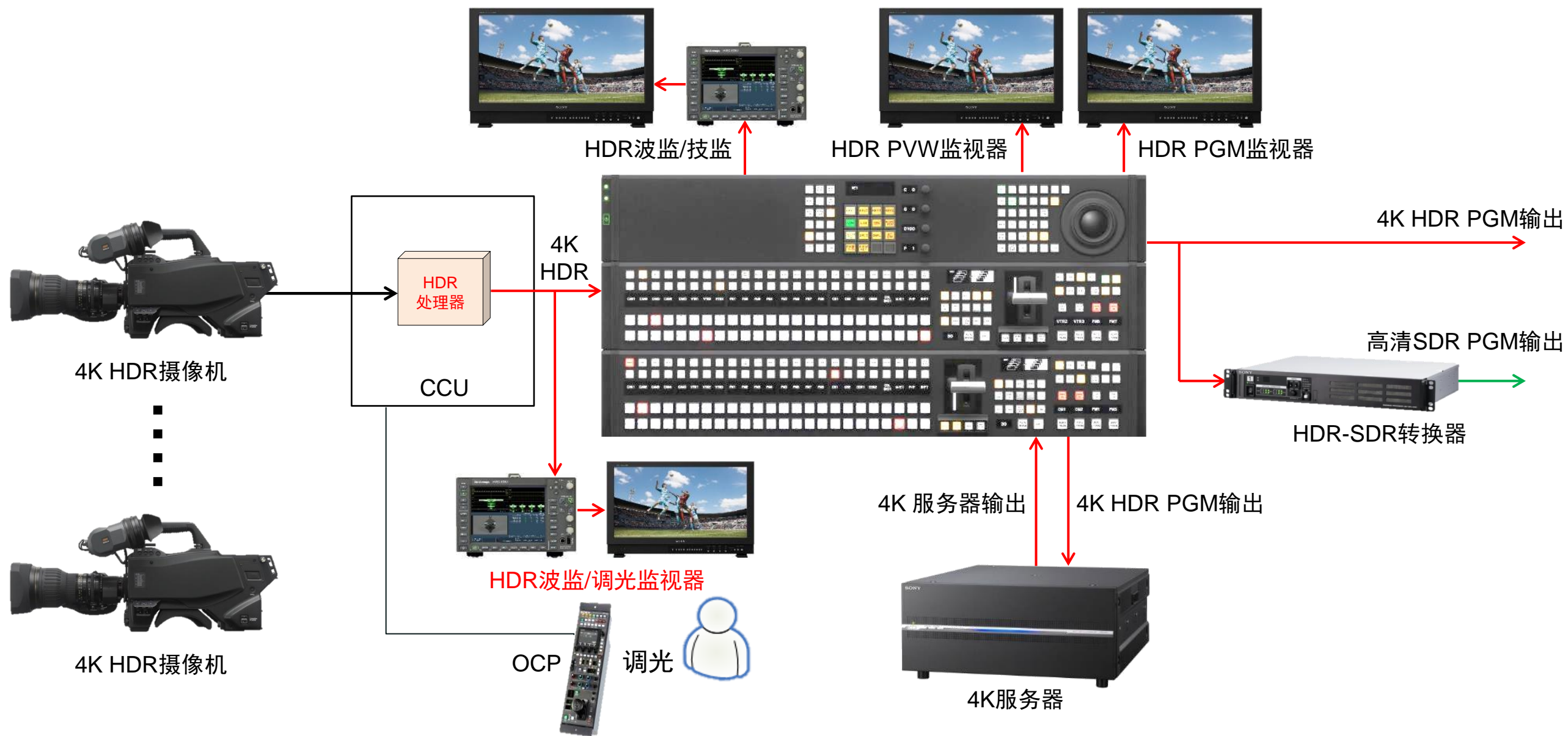
■HDR调光制作HDR：HDR所见即所得

- 用HDR监视器和波监观看HDR图像调光，可获得符合艺术要求的HDR图像，即艺术正确
- 由于HDR的曝光宽容度远大于SDR，获得符合艺术要求的HDR信号后，下转换SDR必须采用自适应的动态参数转换器才能获得高质量SDR输出
  - ❖ 动态参数转换器对不同场景采用不同的HDR-SDR映射关系，能够适应比静态（固定）参数映射更宽的曝光范围
  - ❖ 目前动态转换器产品研发已经取得了很大进展，但还无法完全满足HDR调光的苛刻要求

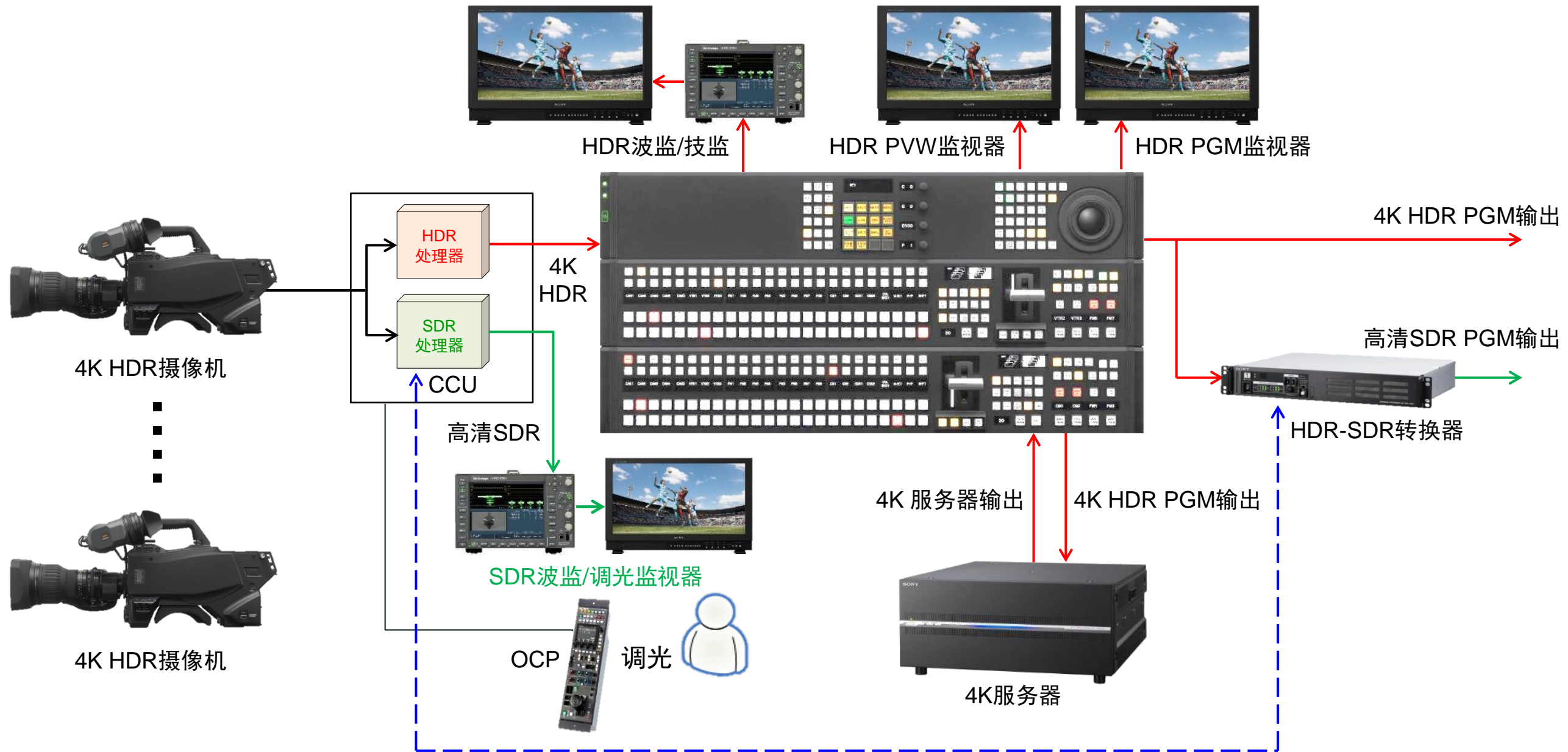
■SDR调光制作HDR：SDR所见即所得

- 用SDR监视器和波监观看CCU输出的SDR图像调光
- 由于HDR与SDR曝光存在固定的比例关系，设置了正确的HDR-SDR映射关系后，用SDR调光得到高质量SDR图像时就可以获得符合技术要求、正确曝光的HDR图像，即技术正确
- 在HDR输出端可以使用固定参数转换器（相当于曝光偏置）进行下转换获得高质量SDR图像
  - ❖ CCU SDR输出与HDR输出端转换器HDR-SDR映射关系相同时，就可以实现SDR所见即所得

# HDR调光制作HDR：HDR所见即所得



# SDR调光制作HDR：SDR所见即所得

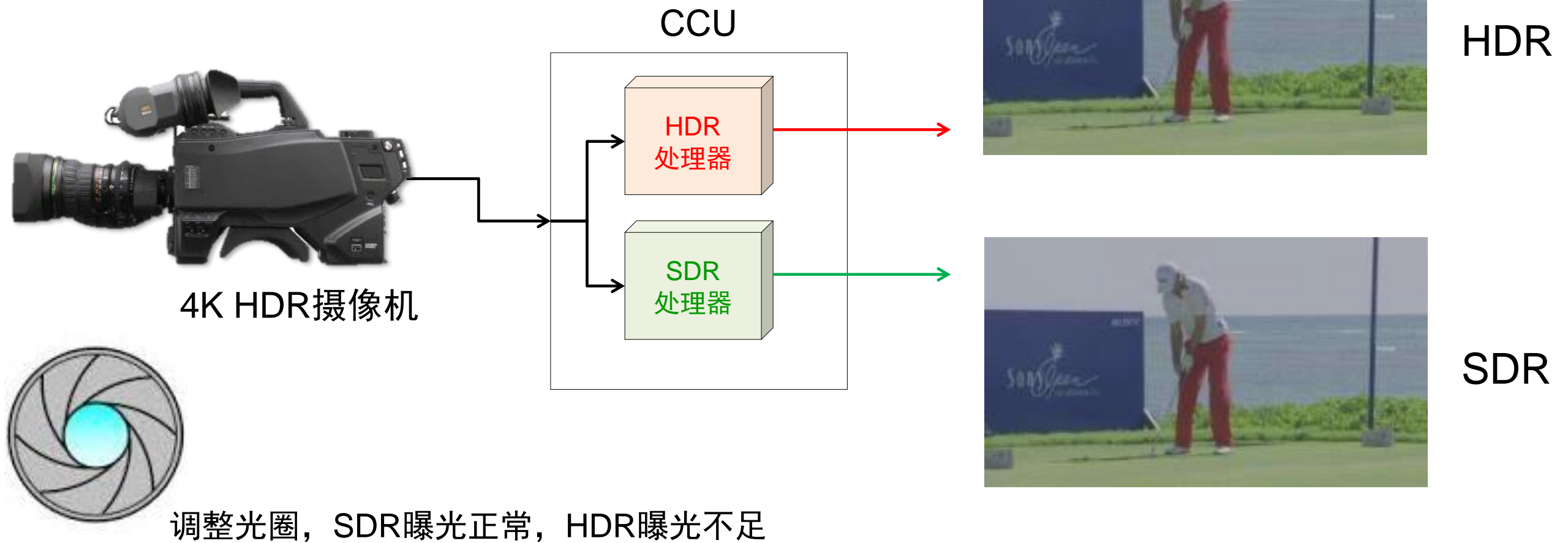


CCU的SDR输出与HDR PGM输出端转换器HDR-SDR映射关系相同时，就可以实现SDR所见即所得

# 4K HDR与SDR同播制作系统

拍摄灰度卡时：

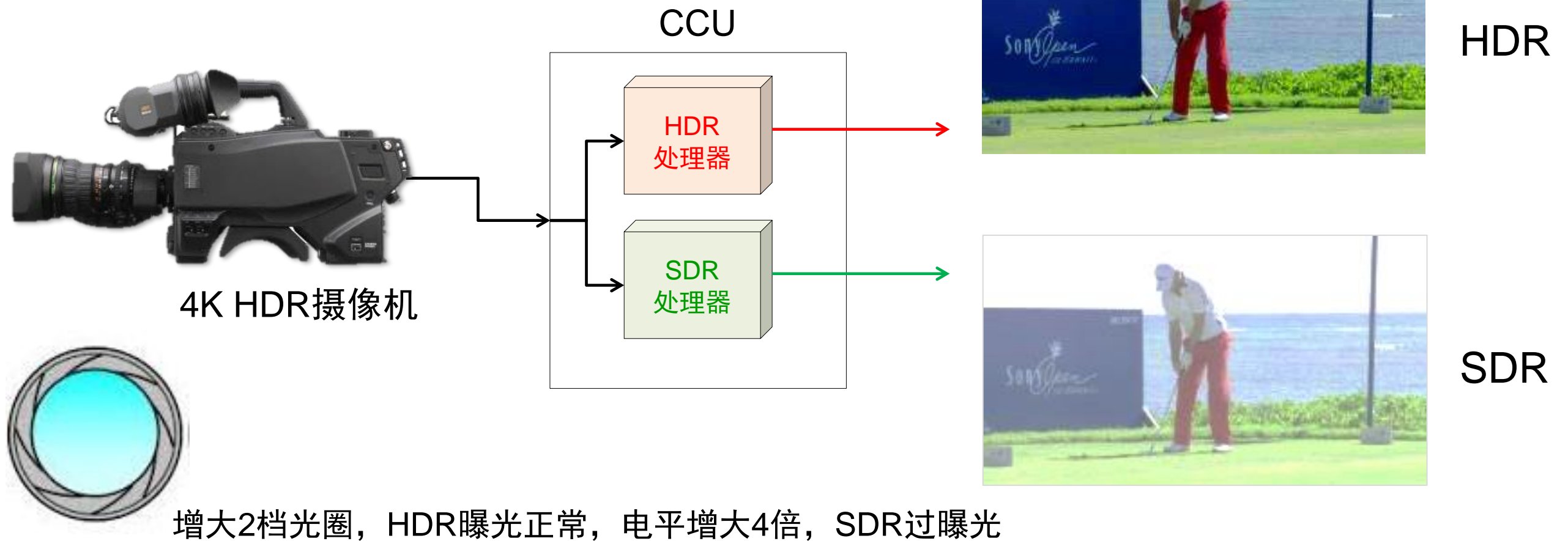
- 高清峰值白电平100%SDR



# 4K HDR与SDR同播制作系统

拍摄灰度卡时：

- HDR参考白电平79%HLG
- 高清峰值白电平过曝

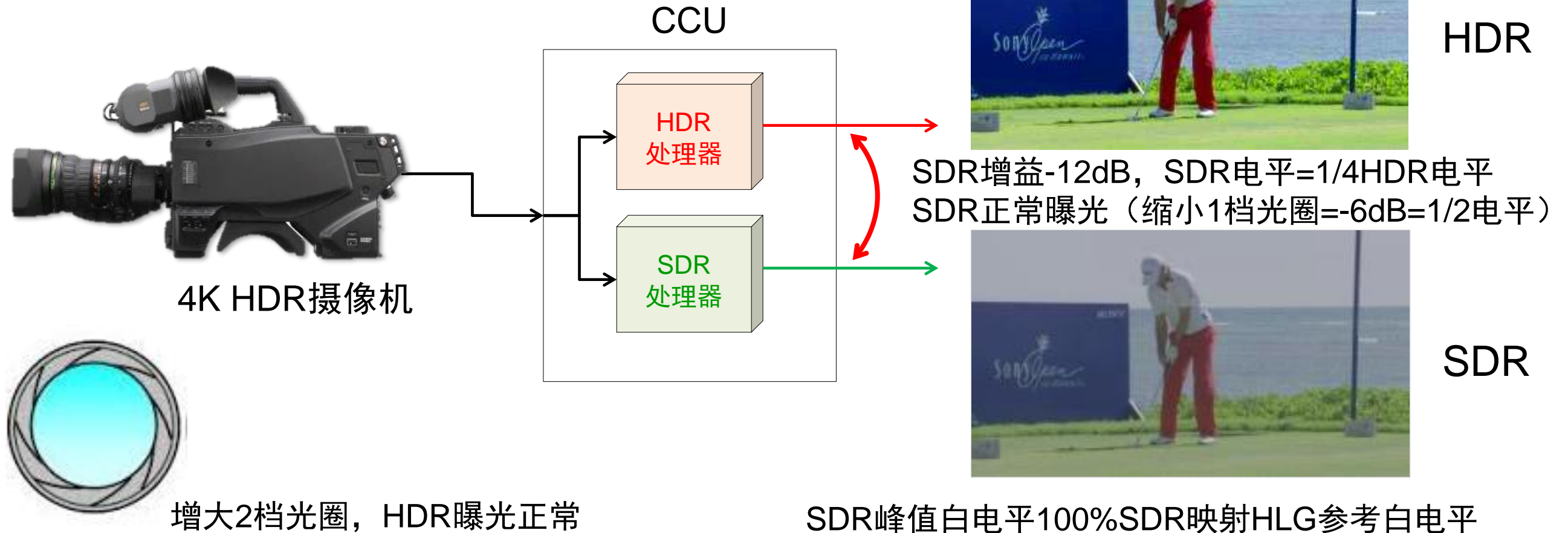


# 4K HDR与SDR同播制作系统

拍摄灰度卡时：

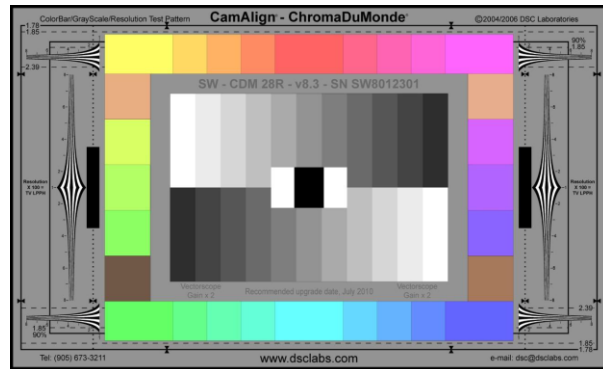
- HDR参考白电平79%HLG
- 高清峰值白电平100%SDR
- 在SDR监视器上，100%SDR代表了79%HLG

HLG参考白电平79%HLG映射SDR峰值白电平

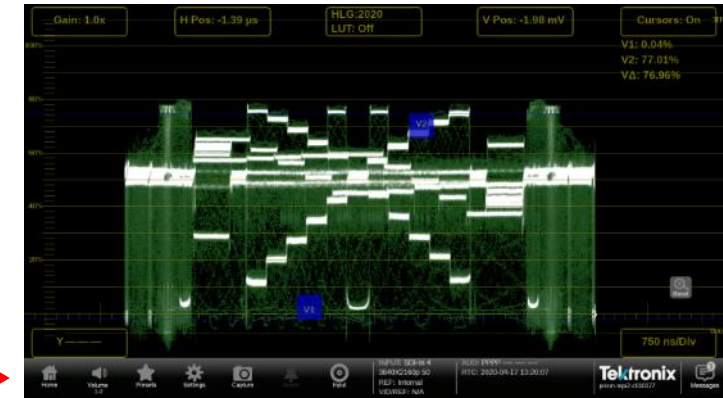
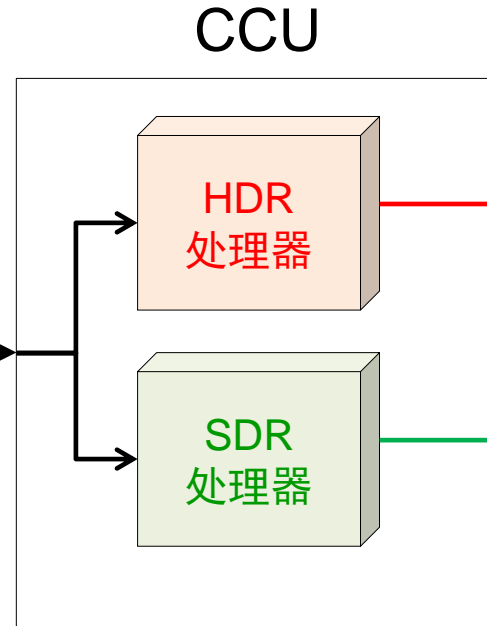


- SDR调光制作HDR：用光圈控制HDR曝光，用HDR-SDR增益差控制SDR曝光
- 锁定HDR-SDR映射关系后，以SDR图像和电平为基准调光，HDR与SDR都能正常曝光

# HLG与SDR映射关系



4K HDR摄像机



HLG

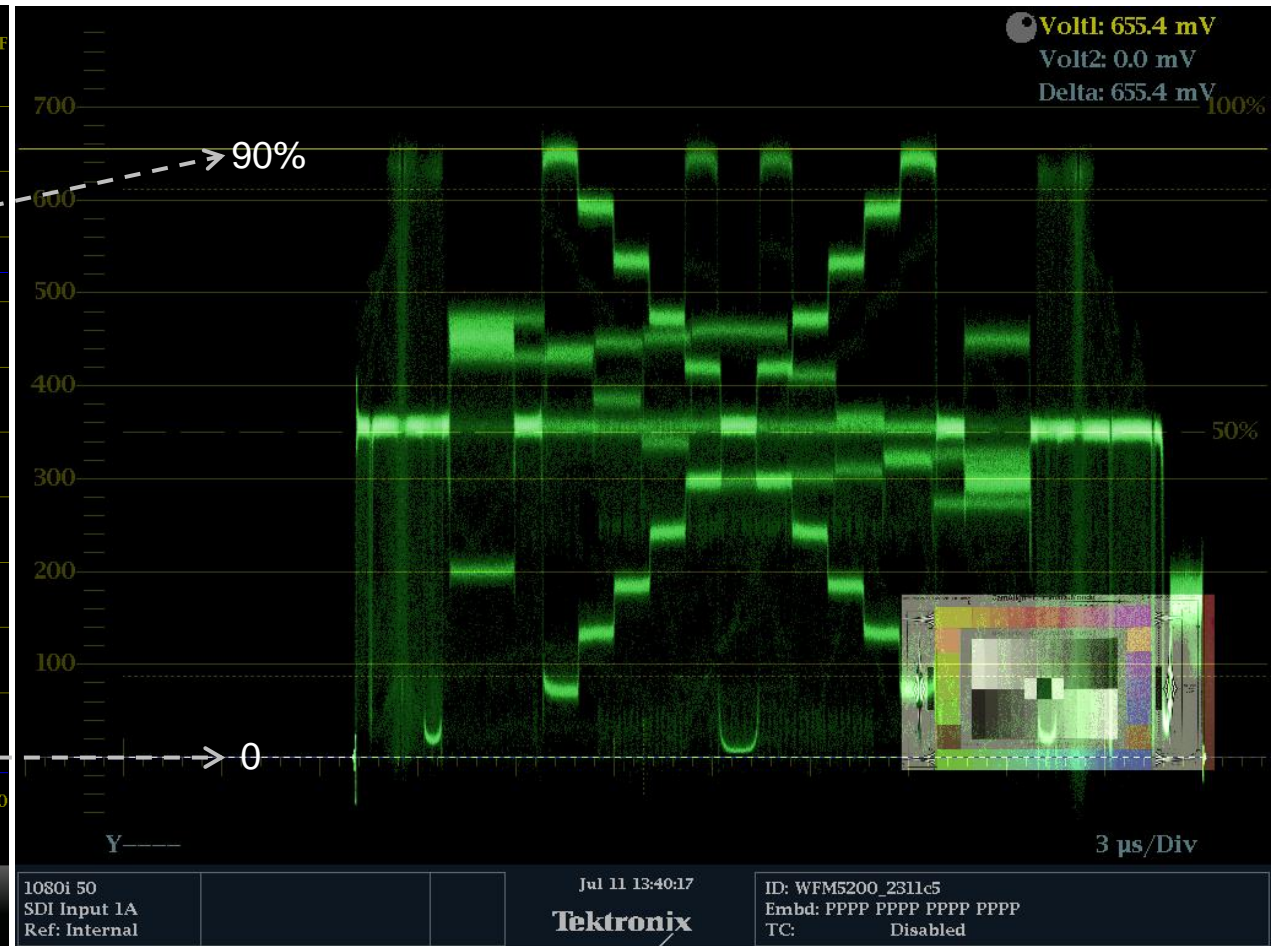
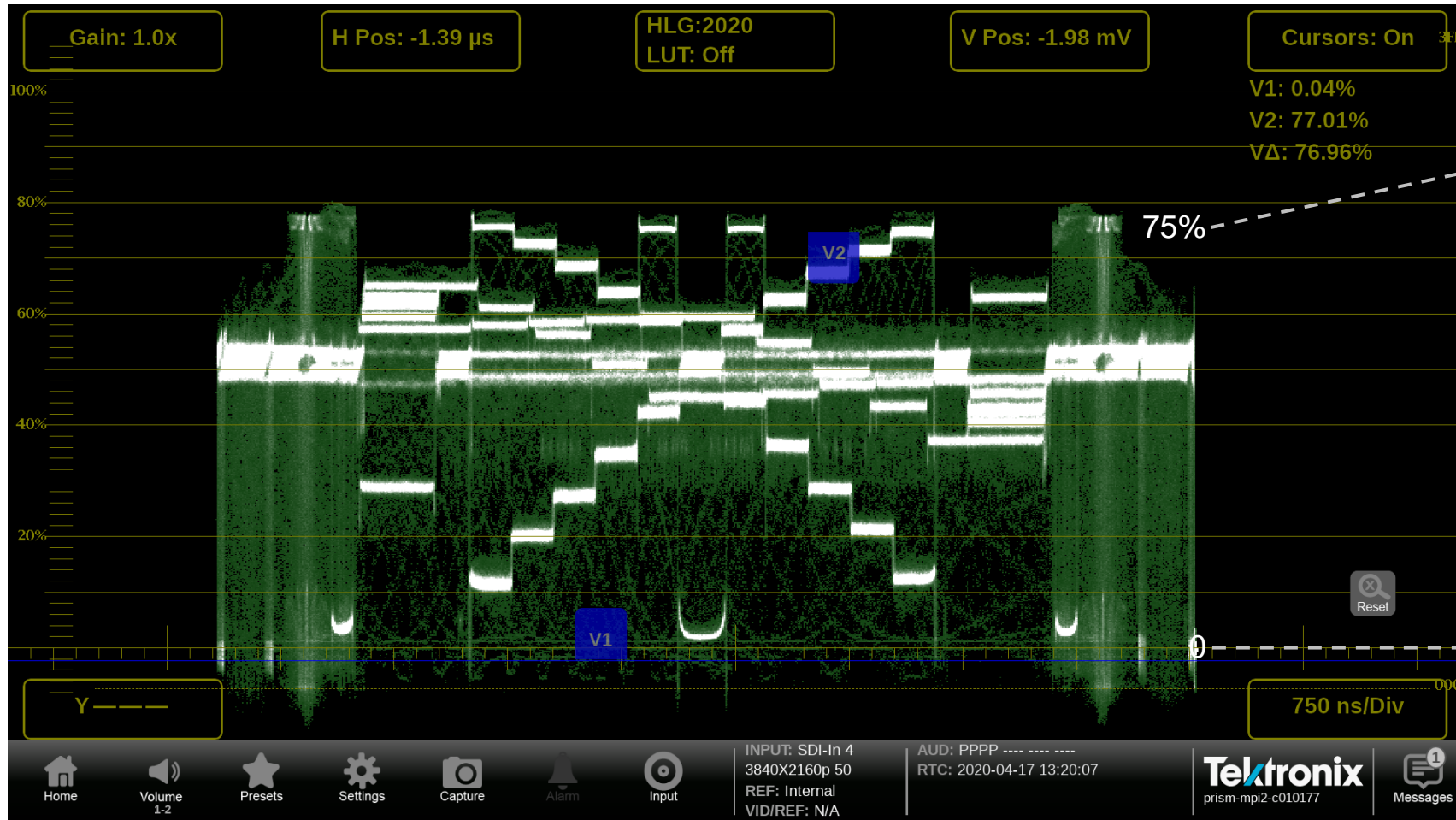
SDR增益-12dB, SDR电平=1/4HDR电平  
SDR正常曝光 (缩小1档光圈=-6dB=1/2电平)



SDR

75%HLG映射90%SDR=79%HLG映射100%SDR

# HLG与SDR映射关系



DSC测试卡 4K HLG Y电平75%

映射

HD SDR Y电平90%

=79%HLG映射100%SDR

# 采用SDR调光制作HDR的优势

## □ 提高调光精度

- 设置正确的HDR-SDR映射关系后，HLG参考白电平映射为SDR峰值白电平，在HLG图像中不是最高亮度的参考白在SDR图像中映射为最高亮度的峰值白，有利于调光工程师根据SDR图像调光经验精确控制曝光量
- 调整光圈时同样的曝光量变化在HDR监视器上亮度变化很小，在SDR监视器上亮度变化很大，因此SDR调光更精准

## □ 精确控制肤色曝光

- 肤色电平都在SDR范围内，用SDR调光能够精确控制SDR和HDR的肤色电平

## □ 确保SDR和HDR质量

- 用SDR调光可在确保高清图像质量的情况下同时获得技术上正确曝光的4K HDR图像

## □ 减轻视觉疲劳

- HDR监视器峰值亮度比SDR高得多，调光师长时间观看容易出现视觉疲劳，判断力下降

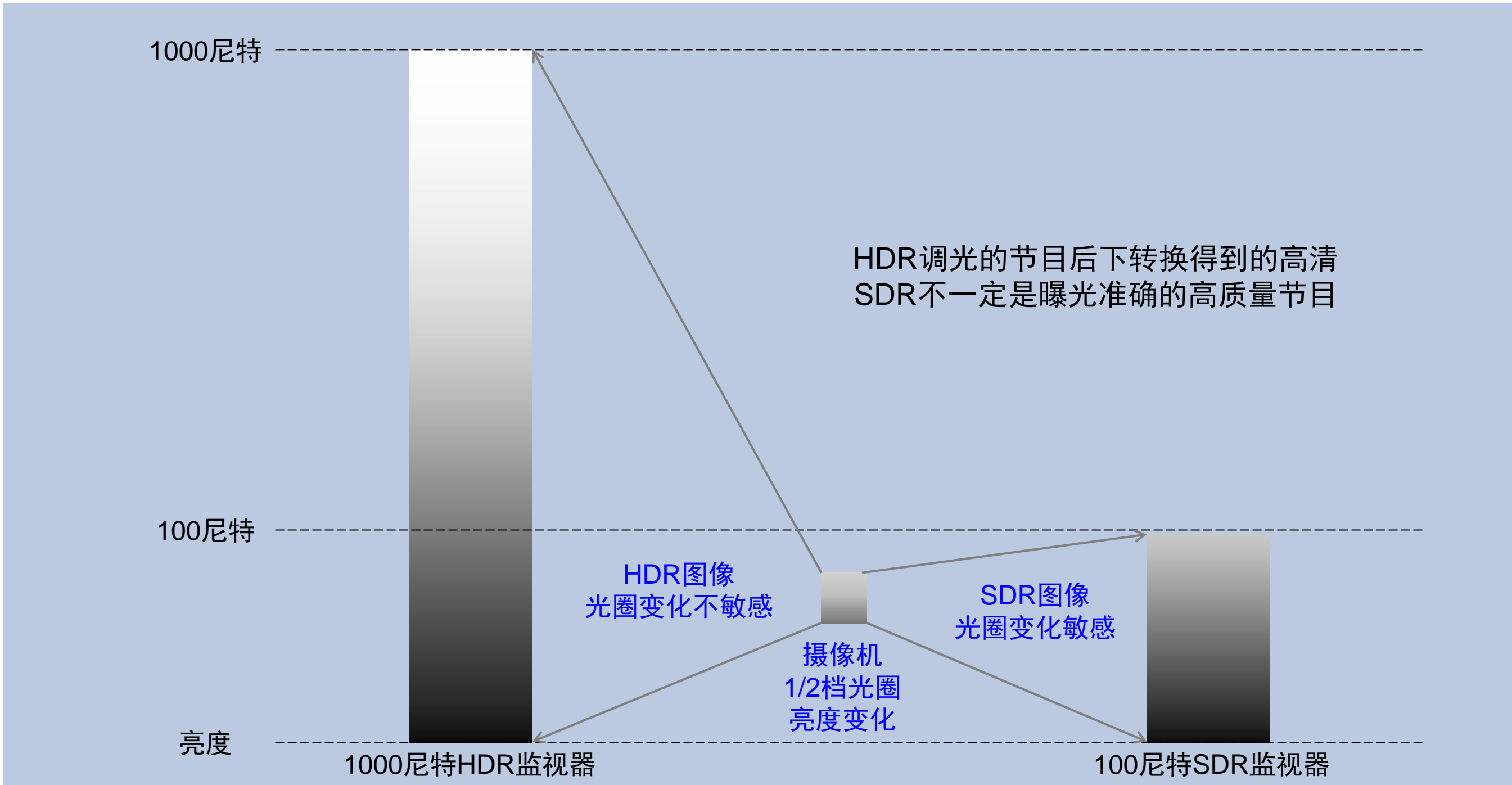
## □ 节省成本

- 为每个调光师配置高质量HDR监视器和波监的成本很高

## □ 保留传统经验和习惯

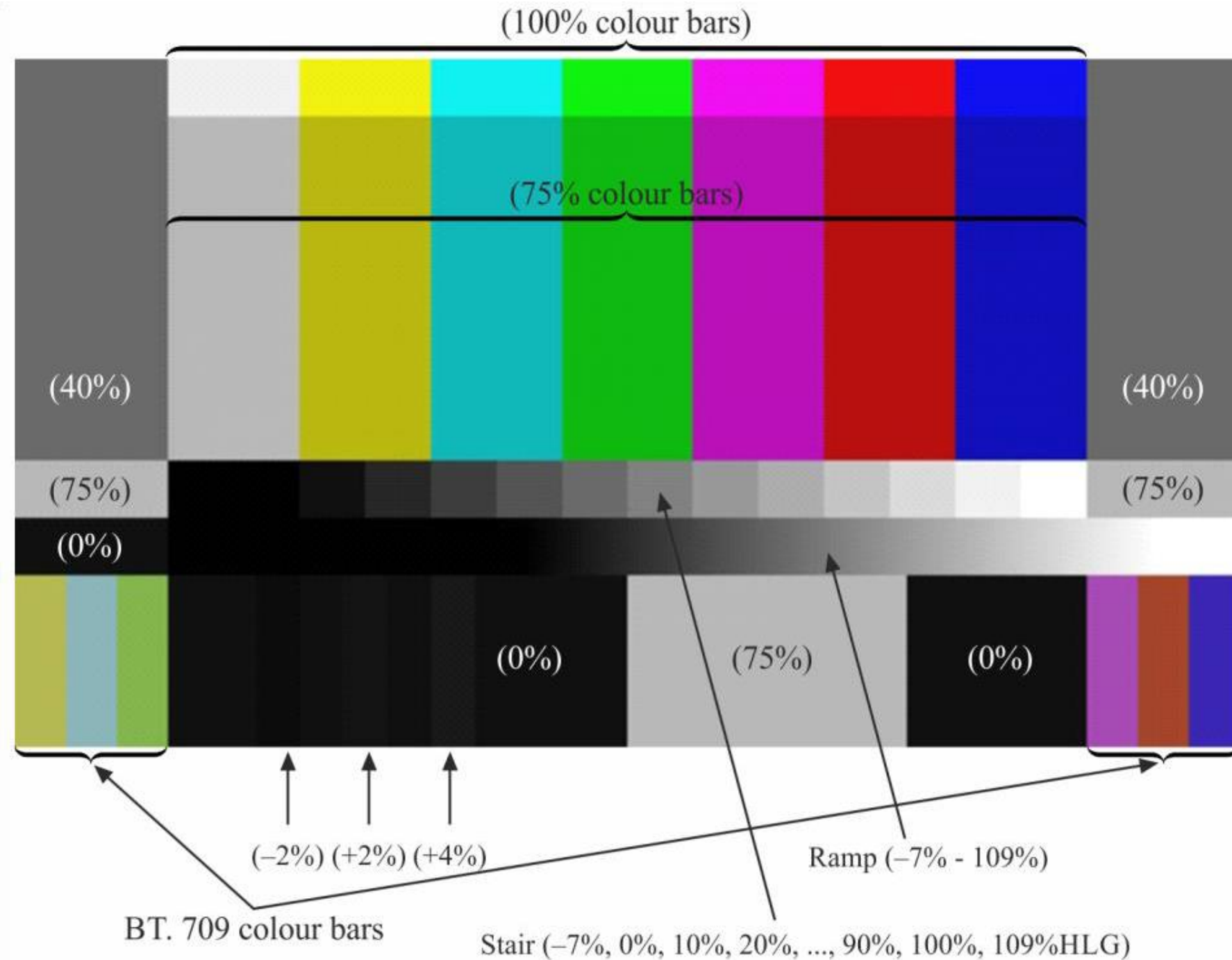
- SDR时代调光师多年积累的宝贵经验和操作习惯得以保留，无需改变

# HDR调光时光圈灵敏度下降



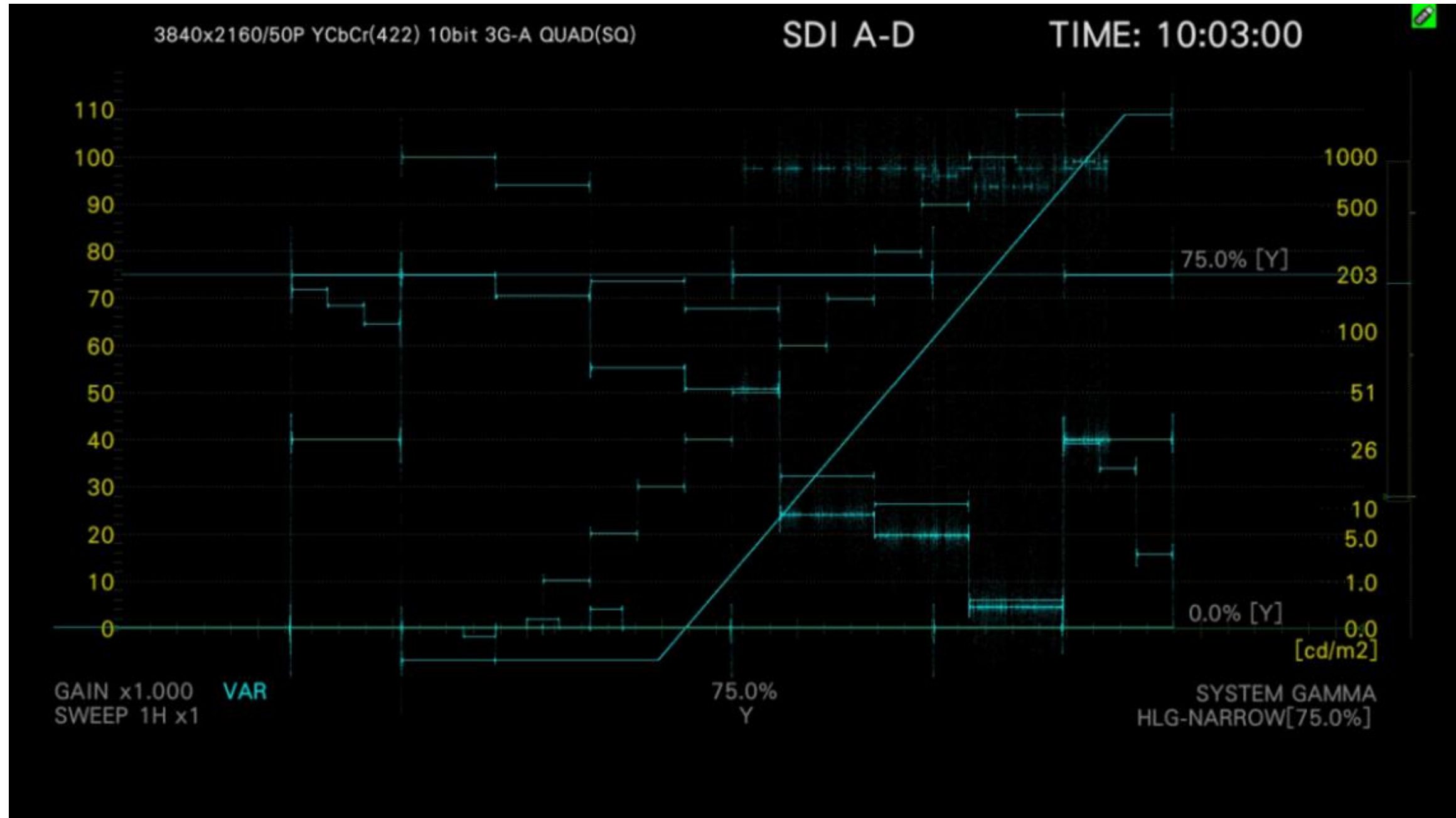
# 直播通道检查：HDR测试信号 – BT.2111

最前端输入HLG窄域BT.2111彩条测试信号



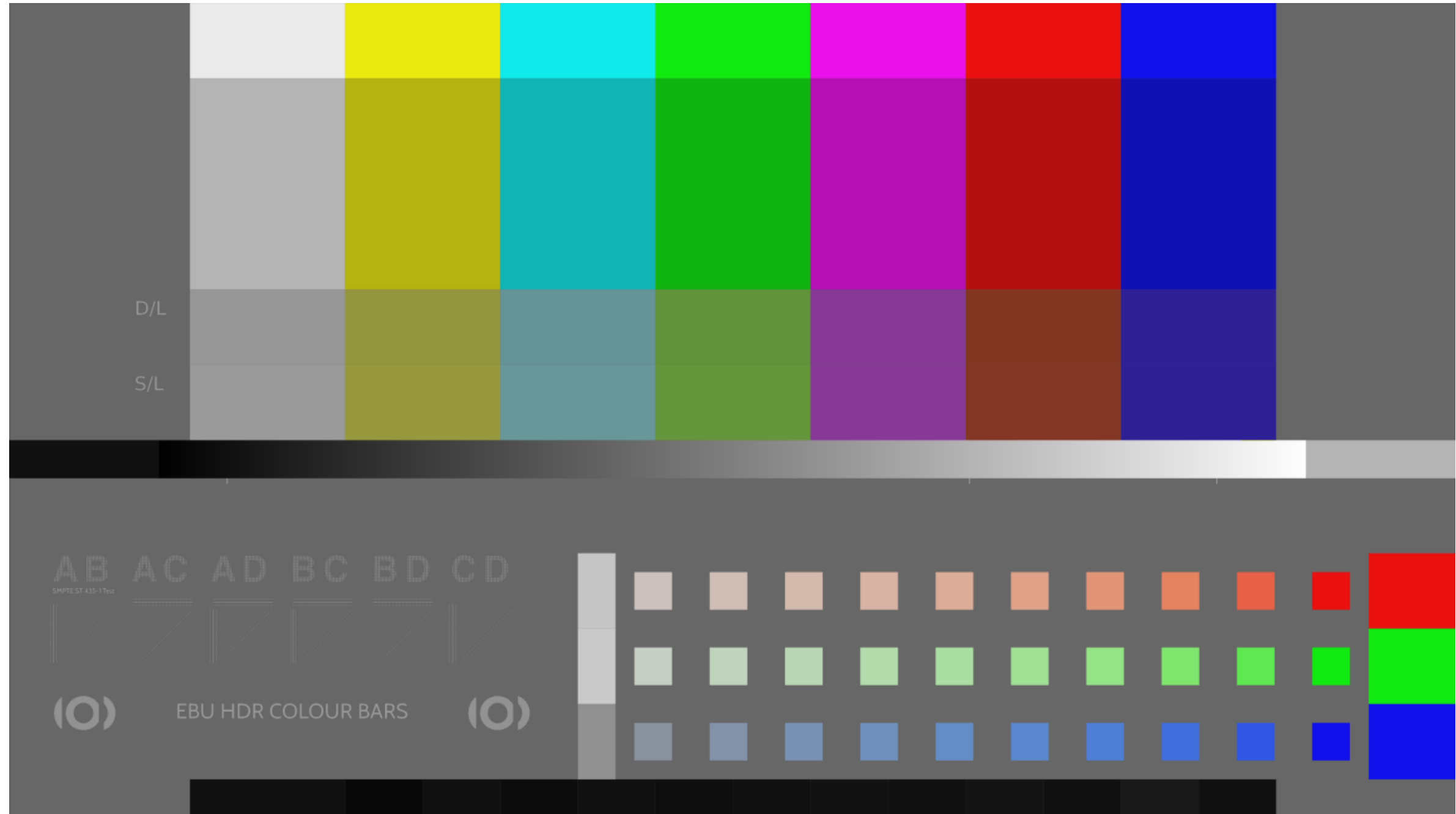
# HDR测试信号 – BT.2111

中间关键点、最后端检查HLG窄域BT.2111彩条测试信号波形 (Y)



# 4K HDR测试信号 – EBU TECH3373

最前端输入TECH3373，中间关键点、最后端检查观看监视器检查2SI连接时线序是否正确



# 非实时录播

## □ 不调色

- 典型的“所见即所得”电视制作流程
- 拍摄、记录的素材和成片的伽玛、色域相同，制作过程中不改变伽玛、色域
- 建议记录适合直播的HLG伽玛、BT.2020色域、10比特4:2:2 YCBCR视频格式

## □ 调色

- 后期制作调色是典型的“所见非所得”电影制作流程
- 记录素材应为无压缩或浅压缩的16比特线性伽玛RAW，或基于Cineon的12比特对数伽玛（如Log C、S-Log3、C-Log、V-Log等）RGB图像格式
- 为保障图像质量，应在ACES空间制作，输出PQ或HLG，而不是用PQ或HLG伽玛拍摄、记录，在PQ或HLG空间制作、输出
- 对“所见非所得”的录播流程来说，拍摄只是第一次艺术创作，关注的是构图、聚焦和曝光，后期调色是第二次艺术创作，关注的是影调和彩色

# 曝光控制

## □ 后期是否调色对前期拍摄曝光控制的要求完全不同

### ■ 录播制作时曝光控制的难度比直播大

- 单人单机操作，人员、设备条件比直播简陋得多
  - ❖ 没有独立的调光师，没有大尺寸HDR监视器、波监
  - ❖ 大多数情况下摄像师只能依靠小尺寸SDR取景器图像完成取景、聚焦、调整光圈控制曝光

### ■ 不调色录播

- 用SDR调光制作HDR
  - ❖ 内置HDR与SDR两个独立信号处理器的摄录一体机
    - 设置正确的HDR-SDR增益后，在摄像机SDR取景器上监看并控制SDR与HDR曝光
- 把HLG当作SDR图像调光
  - ❖ 只有HDR信号处理器的摄录一体机
    - 利用SDR显示设备兼容HLG信号的特点，用SDR取景器直接显示HLG图像控制HDR曝光

### ■ 调色录播

- 曝光控制的目的是有效利用成像器件的全部动态范围，而不是直接获得最终成片的效果，可以用电影行业的多种常用方法和工具控制曝光，例如：
  - ❖ 在电视伽玛监视器上直接显示对数伽玛的低反差画面+波形
  - ❖ 用假彩色标识不同亮度电平，直方图……

# 电视伽玛监视器上显示的Cineon Log对数图像



# 电视伽玛监视器显示的电视伽玛图像



# 调色制作时灰阶的损失

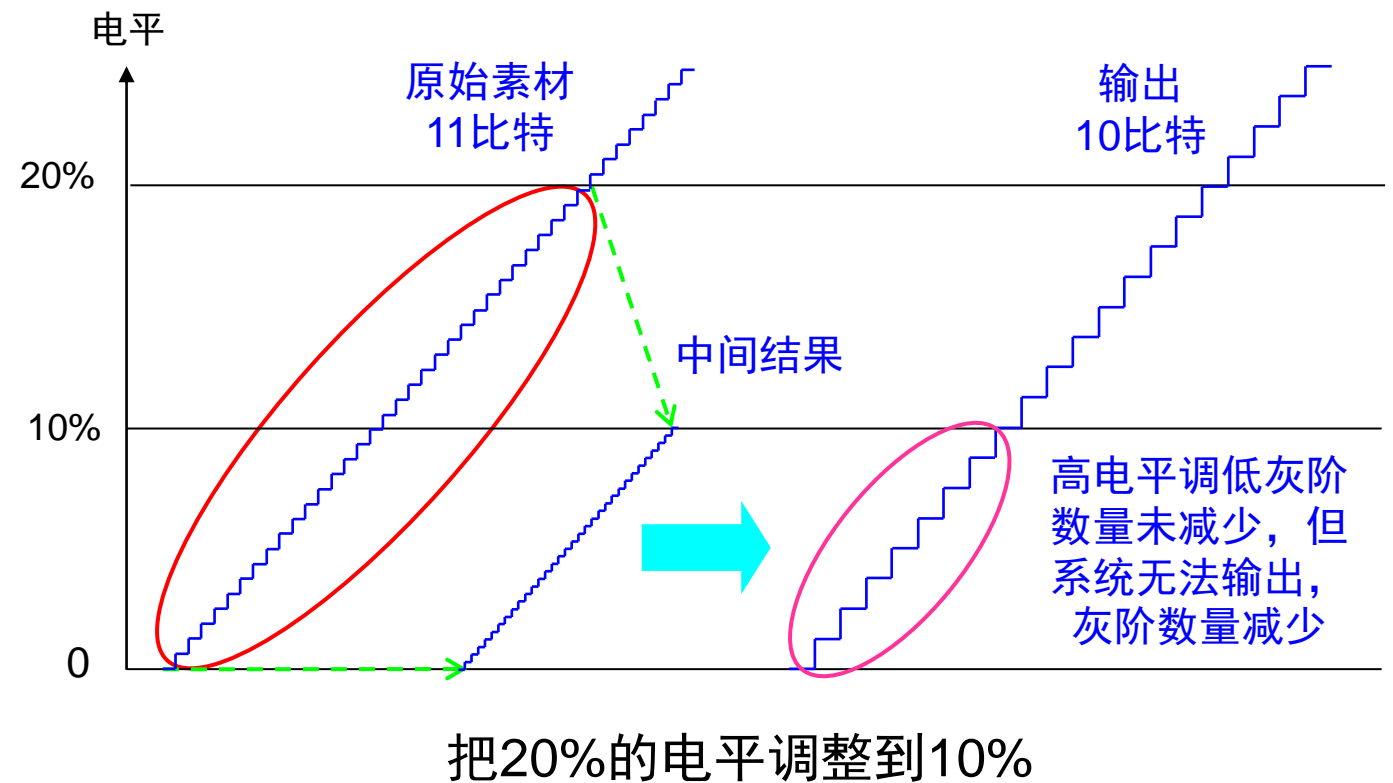
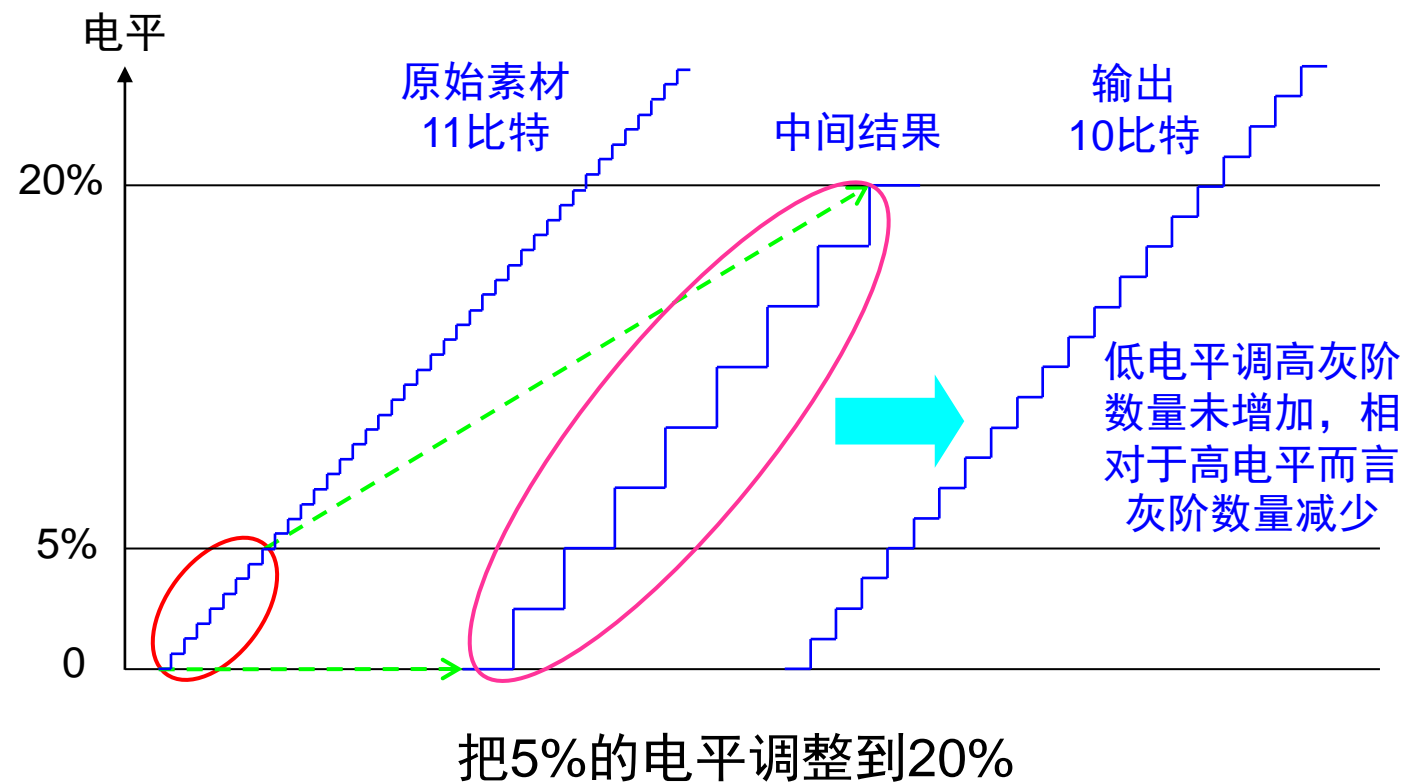
□ 调色的最基本处理就是RGB电平调整

■ 数字处理不是无损的，不论是把低电平调高还是把高电平调低都会损失灰阶数量

□ 保留灰阶数量的方法

■ 提高素材量化精度（量化比特），保证调色时灰度阶有足够多的余量（低电平调高时）

■ 提高调色系统数字处理精度（量化比特），可减少调色处理时灰度阶损失（高电平调低时）



# 调色制作的条件

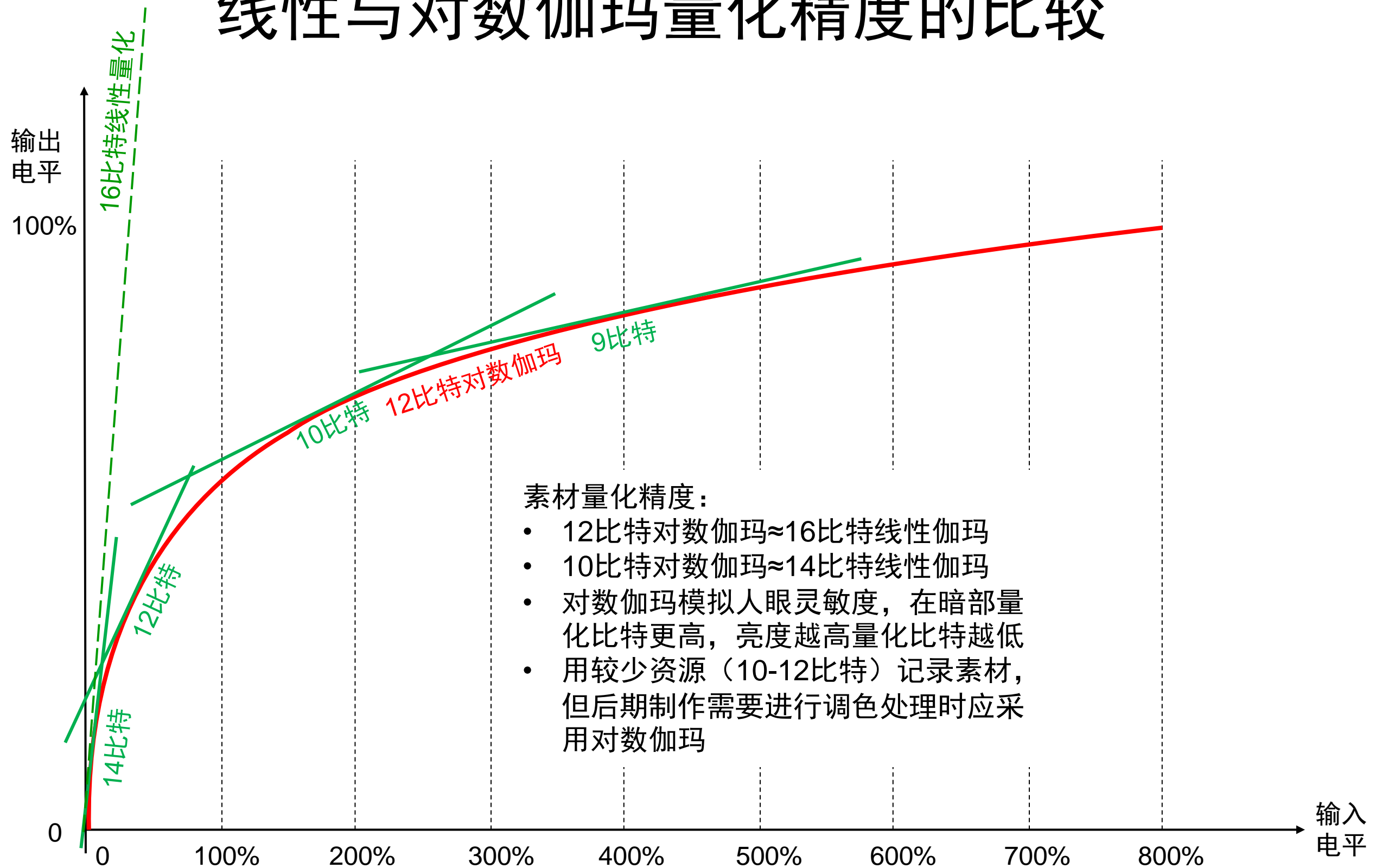
## □ “后期制作万能论”

- “只要前期拍摄时的曝光、聚焦和取景正确，所有效果都可以在后期制作时通过调色得到，想制作出什么效果都是可能的”
- 这个论点需要一个重要的前提条件：在素材上必须有足够多的灰阶信息量，也就是摄影机和存储文件的量化比特足够高

## □ 从灰度信息量的角度来看调色的过程就是损失灰度阶信息量的过程

- 只有拍摄时素材的量化比特余量足够大、制作时量化比特足够高，才能使经过调色等数字处理灰阶损失后的图像仍然保留足够多的灰阶数量
  - 素材记录：拍摄、记录尽可能大的动态范围、尽可能多的灰阶数量、尽可能大的色域
    - ❖ 应采用16比特线性或12比特对数伽玛记录，为后期制作调色、伽玛调整留出足够空间
  - 调色处理：处理精度越高越好，色域越大越好
    - ❖ 32、64比特浮点处理，ACES色域
- 调色过程是不可逆的，调整次数越多遗留的有效灰度阶数量越少
  - 需要对成片调整时应使用原始素材重新调色，不要在已经调色的成品或半成品上反复调整
- 不要对量化比特低的电视伽玛素材（小型机、手持机拍摄的8比特文件）做过多的调色处理，特别是高亮度部分

# 线性与对数伽玛量化精度的比较



# 不同量化比特图像的差别

- 峰值亮度100尼特时，8比特（256灰度阶）是再现图像连续灰度的最低要求
  - 低于8比特时人眼能分辨出灰度层级中的灰度差，出现版画感
- 高质量电视记录、制作、母版需要10比特（1024个灰度阶）
- 高质量数字电影发行拷贝（DCP）需要12比特（4096个灰度阶）
- 高质量调色制作的素材需要16比特线性（65536个灰度阶）或12比特对数伽玛



8比特（256个灰度阶）



4比特（16个灰度阶）



3比特（8个灰度阶）

# HDR转换

# HDR转换

## □ 容器

### ■ 广播电视的主流制作信号格式为10比特4:2:2

- 可以把10比特4:2:2看作容器，传统的SDR与新的HDR使用相同的容器
- 虽然容器相同，但SDR与HDR在同一个容器中映射的空间（坐标系）不同，相同电平时SDR与HDR映射的亮度和彩色不同，相同的亮度和彩色在不同空间中的坐标值不同

## □ 上转换

### ■ 把用SDR坐标系标定的视频信号改为用HDR坐标系标定

- 由于SDR的空间小于HDR，SDR的所有亮度和彩色都在HDR空间内，所以从亮度和彩色信息量的角度看，上转换是可逆的无损处理，不会损失亮度和彩色信息，但转换后的坐标值会变小

## □ 下转换

### ■ 把用HDR坐标系标定的视频信号改为用SDR坐标系标定

- 由于HDR的空间大于SDR，经过转换后只有SDR空间内的亮度和彩色信息能够保留，SDR空间之外的亮度和彩色信息会丢失，所以从亮度和彩色信息量的角度看下转换是不可逆的有损处理

### ■ 下转换是亮度和彩色信息减少的过程，因此必须谨慎处理超过SDR空间的亮度和彩色信息

- HLG下转换SDR：75%HLG电平映射为100%SDR电平，对超过75%HLG电平的信号有硬削波或软削波两种处理方法
  - ❖ 硬削波损失了超过75%HLG电平的所有高光信息，软削波在下转换时也被称为色调映射，用比较少的电平资源保留了部分高光信息，与摄像机的拐点处理相似
- BT.2020宽色域下转换BT.709窄色域：对超过BT.709色域的彩色信息也有硬削波或软削波两种处理方法
  - ❖ 硬削波损失了宽色域的信息，软削波用较少资源保留了部分宽色域信息

## □ 从亮度和彩色信息处理的角度看，HDR下转换SDR的难度比SDR上转换HDR的难度大

# BT.2408对HDR转换名词的定义

## □ 上转换 (Up-Convert)

### ■ SDR转换为HDR的信号处理统称为上转换

- 上转换时，以100%动态范围为分界线，100%动态范围以下的SDR内容用场景参考映射或显示参考映射上转换；高于100%动态范围的拐点部分用直接映射或上映射（反色调映射）上转换

## □ 下转换 (Down-Convert)

### ■ HDR转换为SDR的信号处理统称为下转换

- 下转换时，以100%动态范围为分界线，100%动态范围以下的SDR内容用场景参考映射或显示参考映射下转换，高于100%动态范围的HDR内容用下映射（色调映射）或硬削波下转换

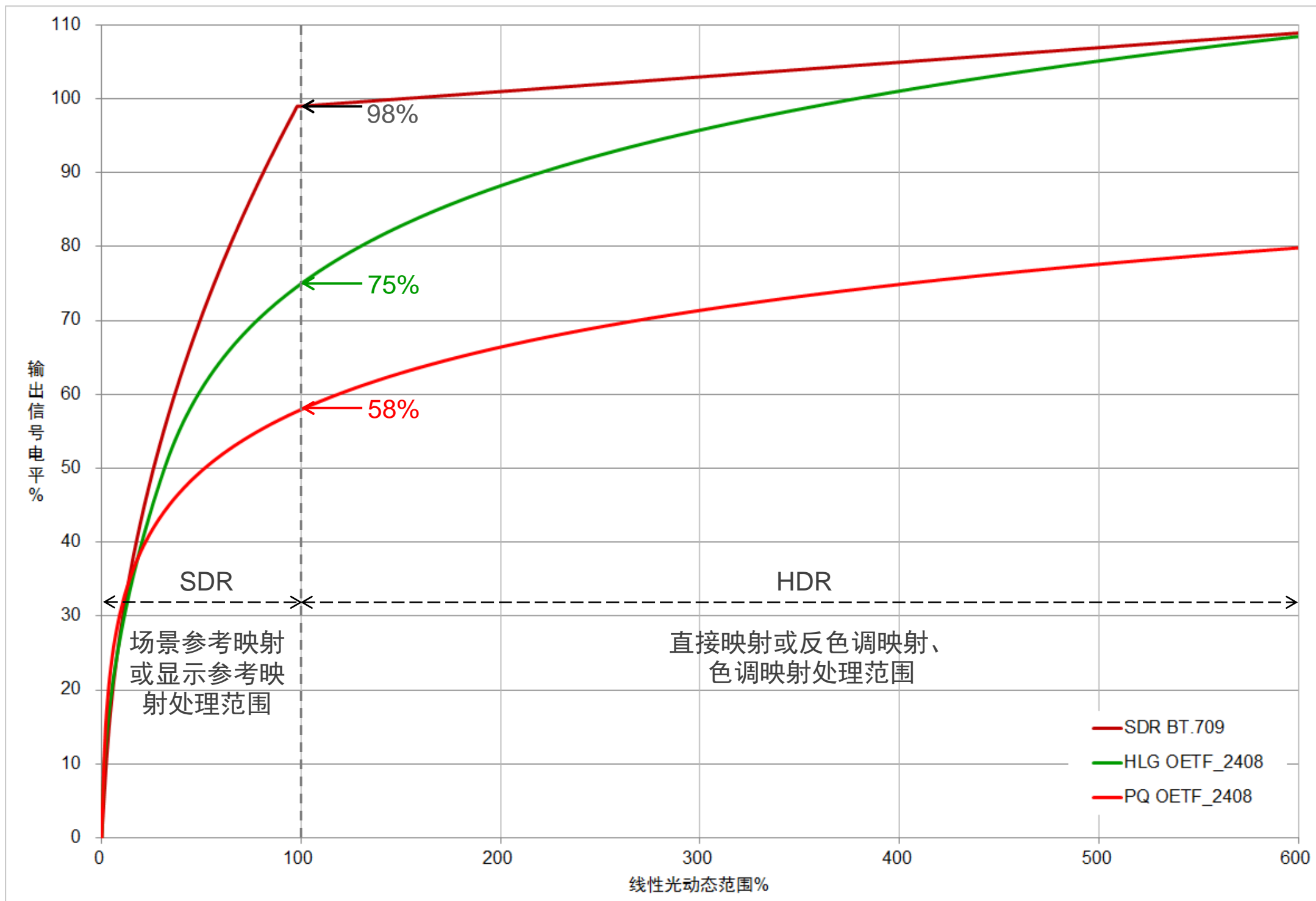
## □ 场景参考映射 (SR) 与显示参考映射 (DR)

### ■ HDR与SDR互转时先把非线性电信号转换成代表线性光的电信号，再转换为非线性电信号

### ■ 可以把非线性电信号转换为线性光信号的过程想象为用摄像机拍摄画面

- 场景参考映射 (Scene Referred mapping) 相当于直接拍摄现场场景，把电信号转换为与场景光相同的线性光
- 显示参考映射 (Display Referred mapping) 相当于拍摄监视器显示的场景，把电信号转换为与监视器显示光相同的线性光
- 由于电视的系统伽玛OOTF是非线性的，因此场景光与显示光的对比度、彩色饱和度并不完全相同，SR与DR的转换结果存在差别

# HDR转换时的范围划分



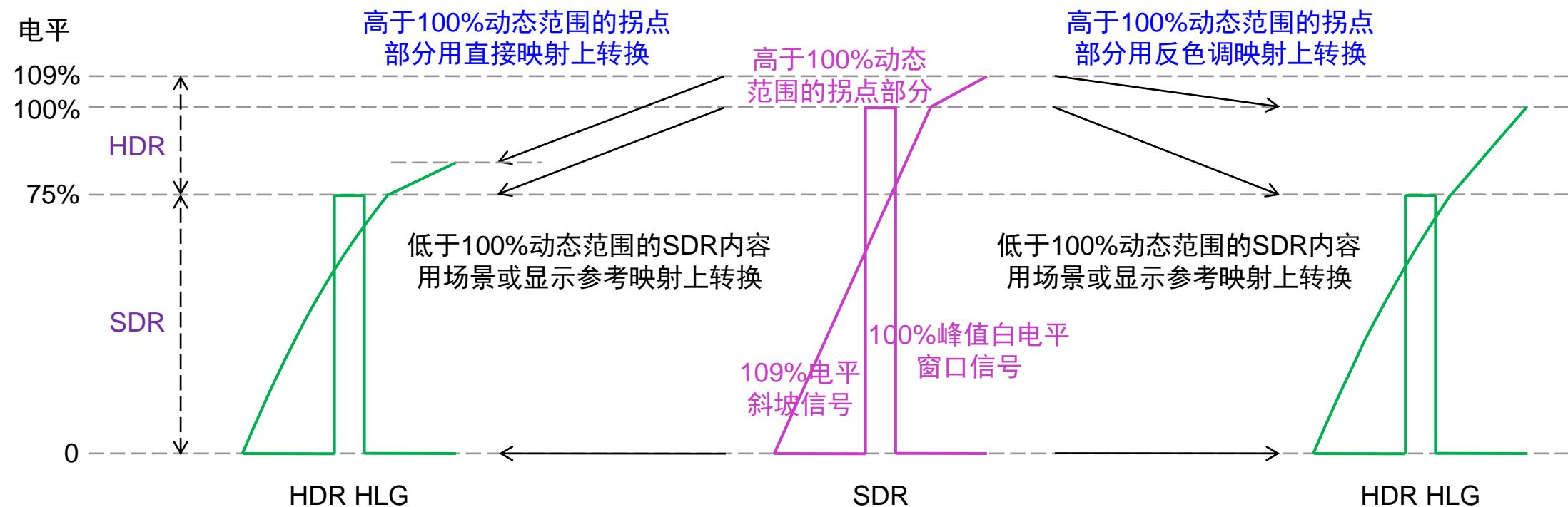
# 直接映射与反色调映射

## 直接映射 (Direct Mapping)

- 直接映射上转换时不对SDR信号中高于100%动态范围的拐点部分进行扩展处理，以保持原始SDR的观感

## 上映射 (Up-Mapping) / 反色调映射 (Inverse Tone Mapping)

- 在BT.2408中，上映射也被称为反色调映射 (ITM)，一般把从少到多的映射称为反色调映射ITM
  - 反色调映射上转换把SDR信号中高于100%动态范围的拐点部分扩展到了HDR范围，以模拟HDR内容的观感



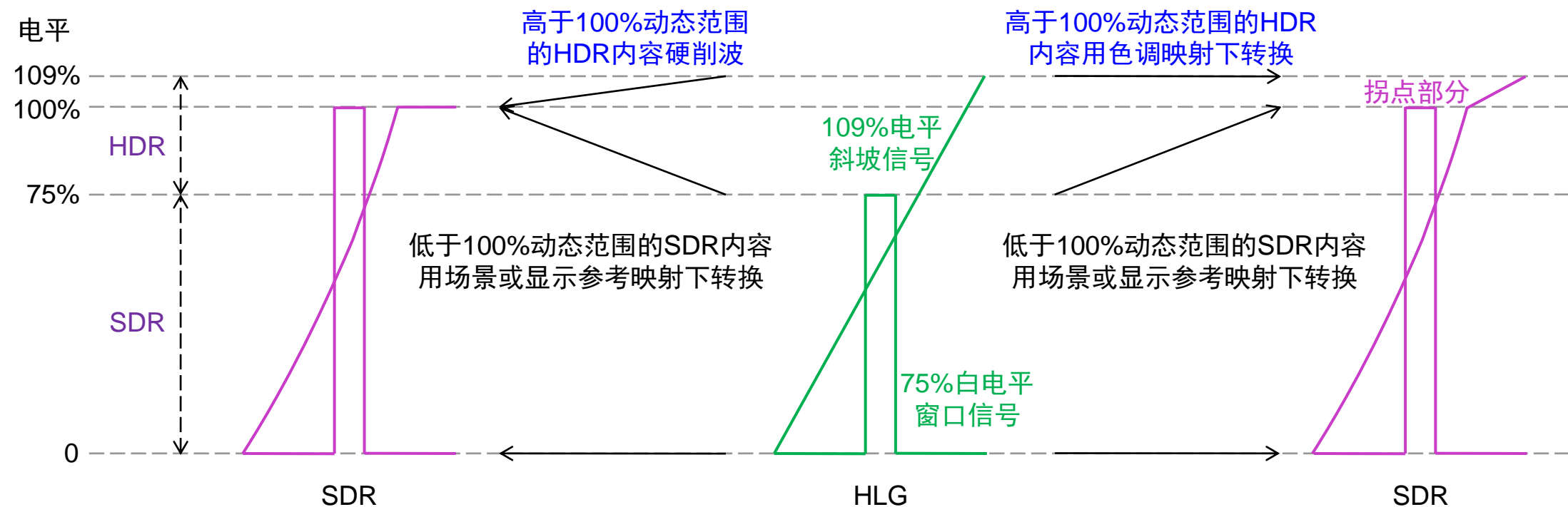
# 硬削波与色调映射

## 硬削波 (Hard Clipping)

- 下转换时，在某些情况下硬削波比色调映射（软削波）更合适
  - 硬削波将超过阈值的所有信号都削波到该阈值

## 下映射 (Down-Mapping) / 色调映射 (Tone Mapping)

- 在BT.2408中下映射也被称为色调映射 (TM)，一般把从多到少的映射称为色调映射TM
  - 色调映射下转换把HDR信号中高于100%动态范围的HDR内容压缩到了SDR信号的拐点处理范围内，与SDR摄像机处理HDR高光内容的方法一样，属于软削波处理

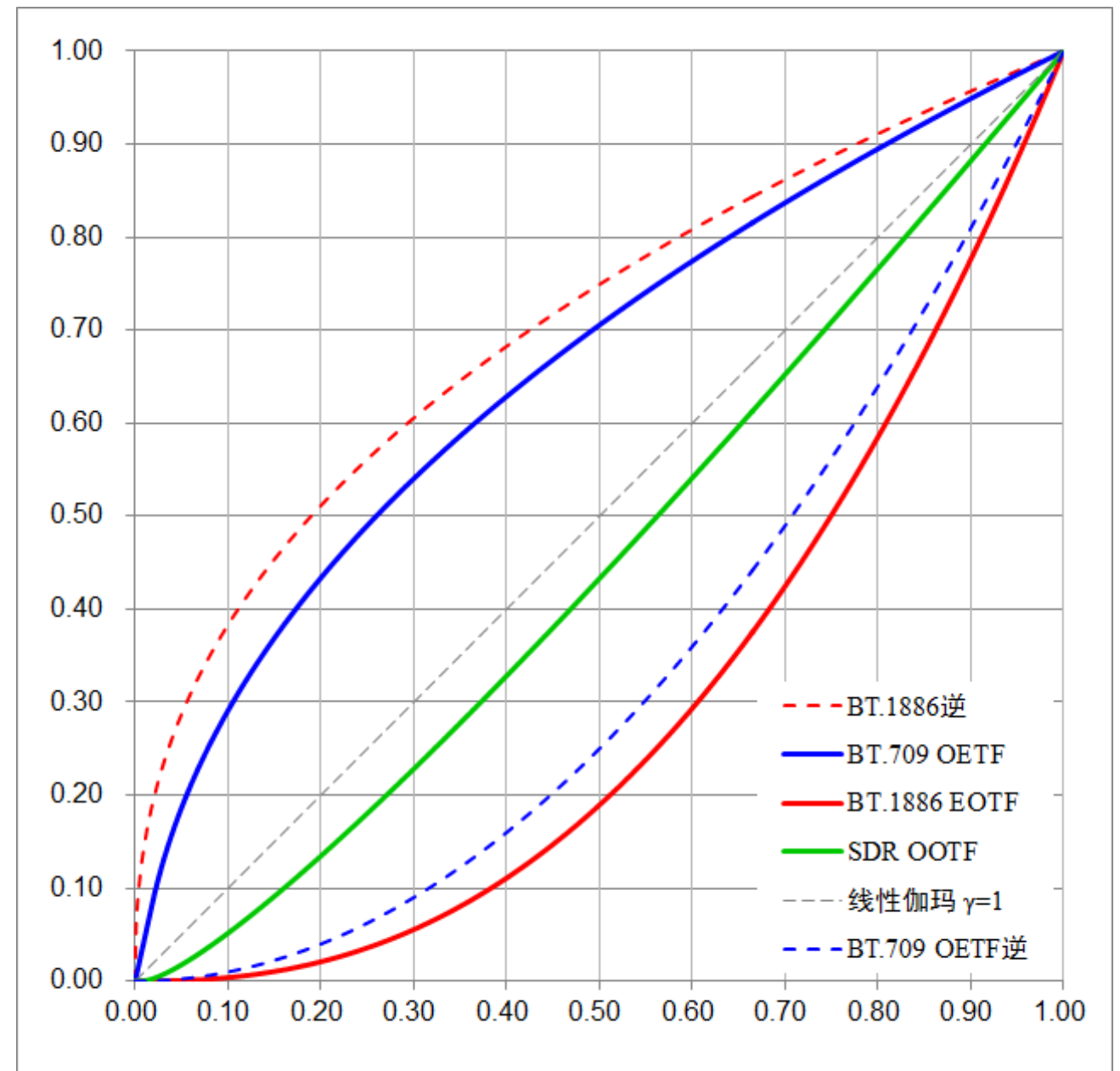


# SDR电视伽玛特性

□  $OETF = OETF \times EOTF = BT.709 \times BT.1886$

■ SDR电视的OETF与EOTF不是互逆的关系，拍摄与显示伽玛不互为反函数

- BT.709拍摄伽玛（OETF）近似值为0.5
- BT.1886显示伽玛（EOTF）为2.4
- 系统伽玛（OOTF）近似值为 $0.5 \times 2.4 = 1.2$
- 因为SDR电视的系统伽玛OOTF不是线性的1而是非线性的1.2，所以监视器显示图像的对比度、彩色饱和度比场景高，出现了灰度失真
- 观众普遍接受并习惯了这种灰度和彩色略有失真、对比度和彩色饱和度比实际场景高的图像，观众喜欢比实际场景更漂亮而不是更真实的画面
- 要得到系统伽玛OOTF=1，与真实场景对比度和彩色饱和度相同、没有灰度失真的线性特性，需要用BT.709的反函数BT.709 OETF逆、伽玛 $=1/0.5=2.0$ 的幂函数与BT.709匹配；或用BT.1886 EOTF的反函数BT.1886TF逆、伽玛值 $=1/2.4=0.42$ 的幂函数与BT.1886 EOTF匹配



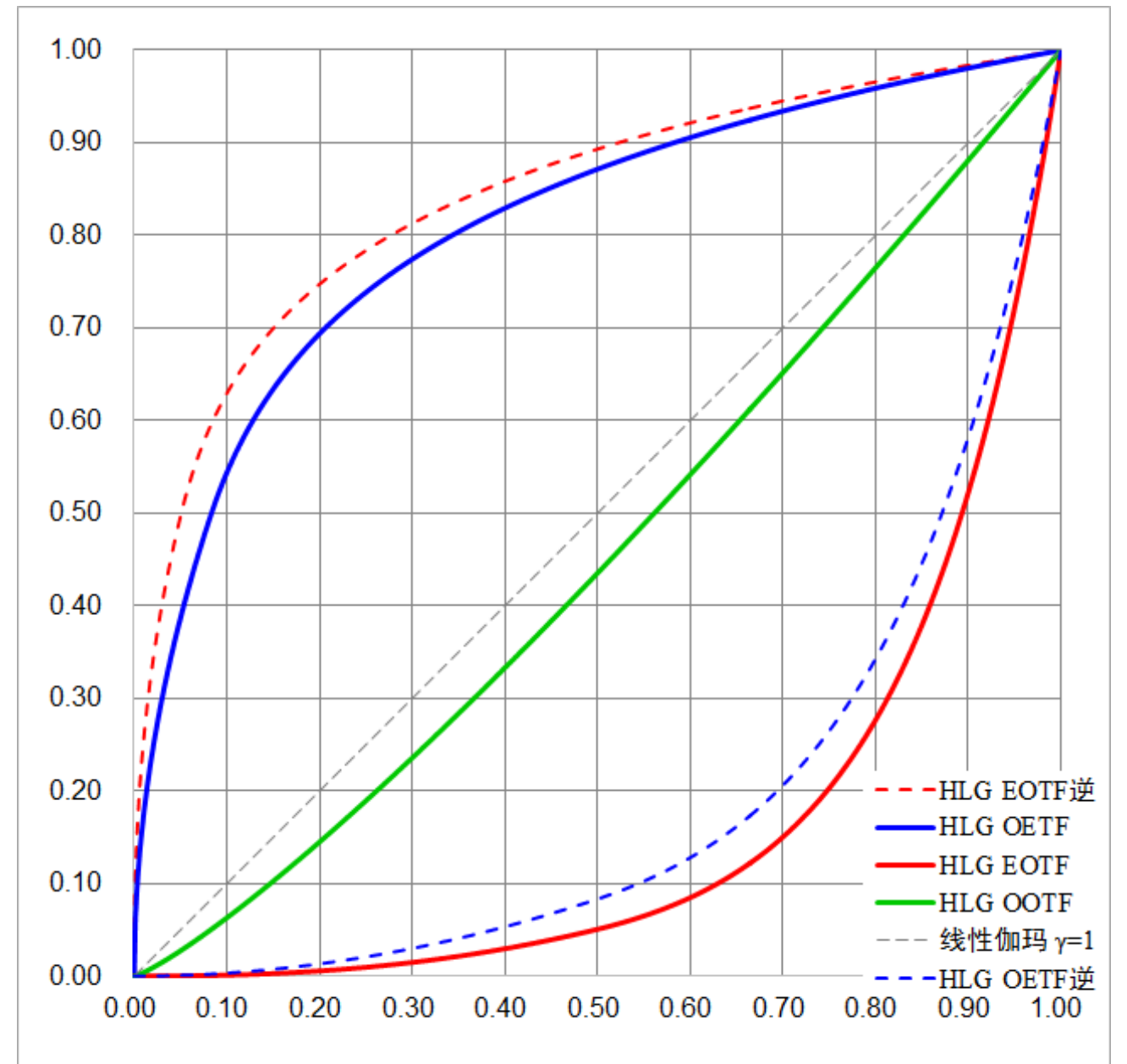
归一化的SDR电视伽玛特性

# HLG伽玛特性

□ HLG OOTF = HLG OETF × HLG EOTF

■ HLG沿用了SDR的OOTF特性，其OETF与EOTF不是互逆的关系，拍摄与显示伽玛不互为反函数

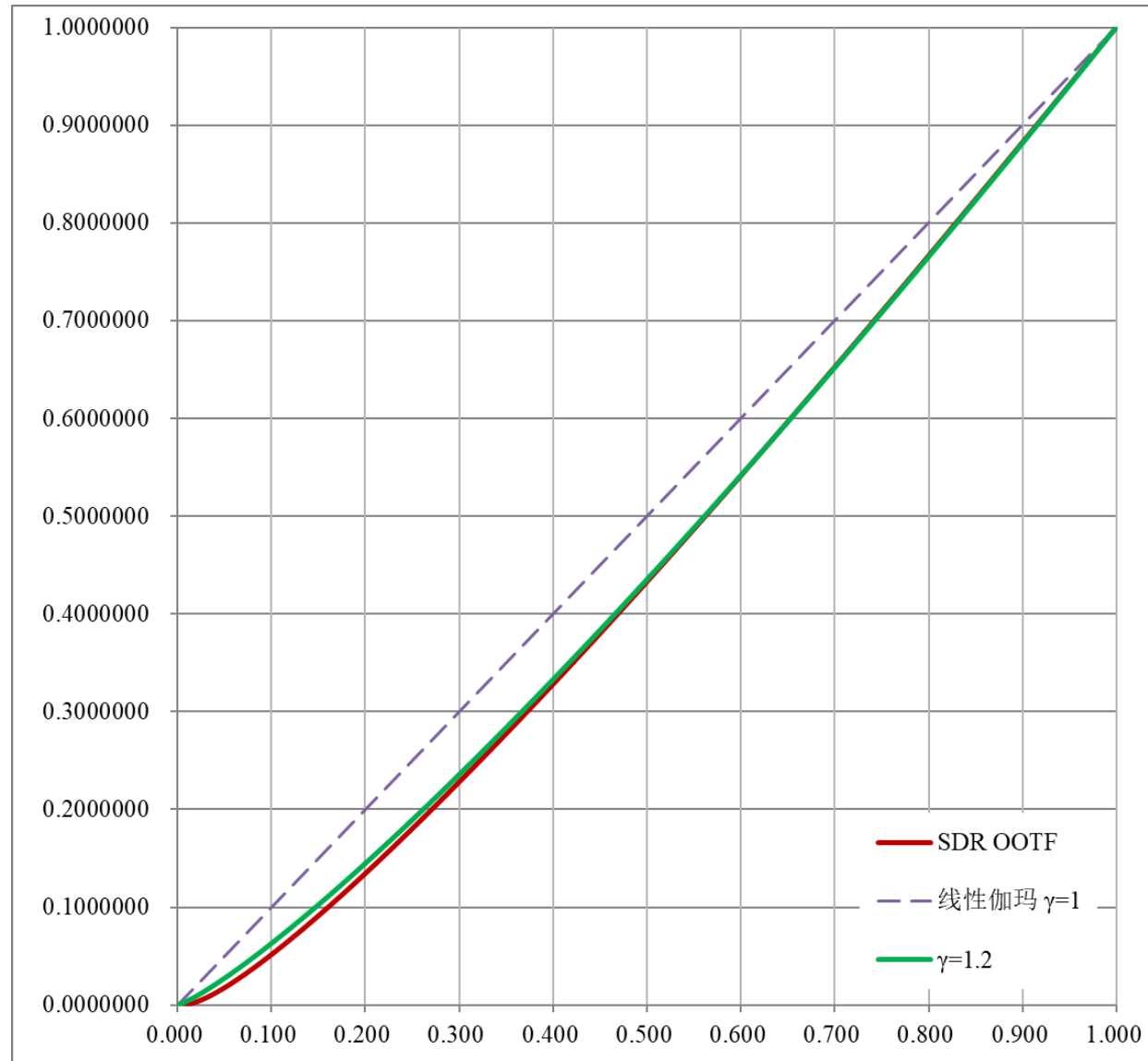
- HLG OOTF = 1.2（峰值亮度1000尼特时）
- 因为HLG的系统伽玛OOTF不是线性的1而是非线性的1.2，所以监视器显示图像的对比度、彩色饱和度比场景高，出现了灰度失真
- 观众接受、习惯并喜欢这种SDR时代延续至今、具有美化功能的OOTF特性
- 要得到系统伽玛OOTF=1，与真实场景对比度和彩色饱和度相同、没有灰度失真的线性特性，需要用HLG OETF的反函数（HLG OETF逆）与HLG OETF匹配；或用HLG EOTF的反函数（HLG EOTF逆）与HLG EOTF匹配



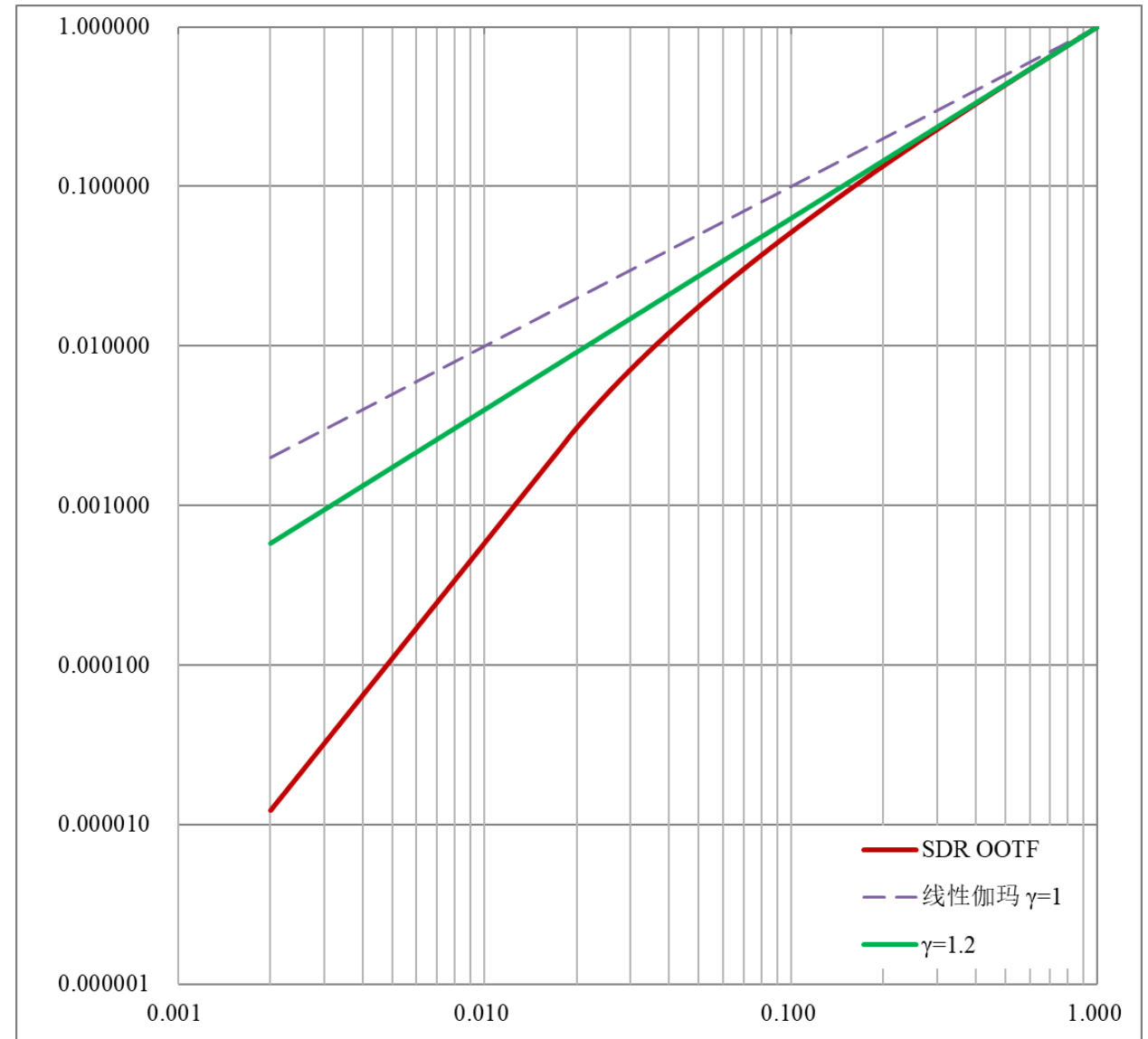
归一化的HLG电视伽玛特性

# 场景光参考（SR）与显示光参考（DR）

- SDR的OOTF近似值1.2，HLG的OOTF=1.2，两者在暗部存在差异
- SDR上转换HLG或HLG下转换SDR后其OOTF必须是1.2
- 只能在转换前或转换后信号的OOTF中选择保留一个



SDR与HLG OOTF特性比较（线性坐标，归一化）

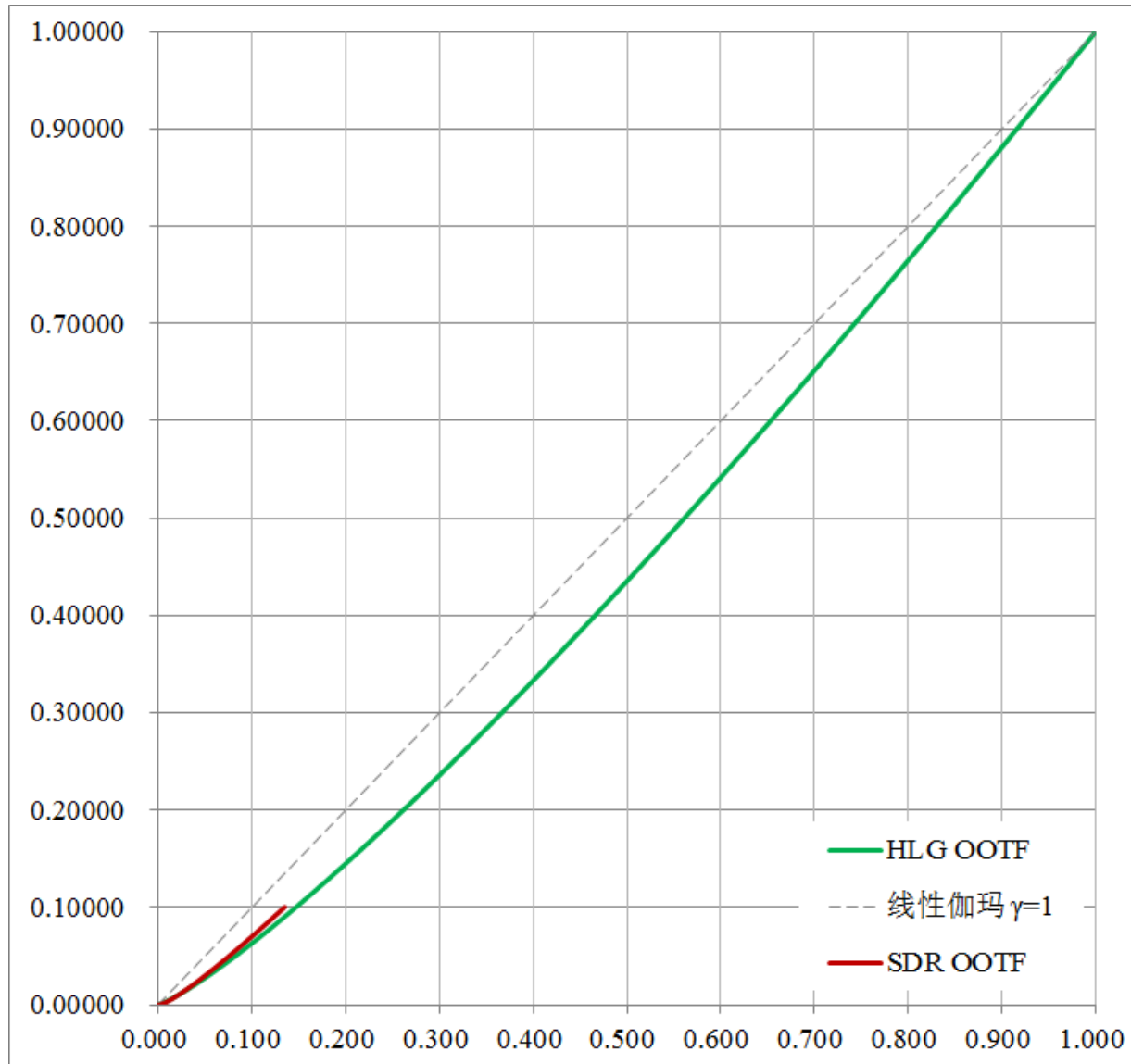


SDR与HLG OOTF特性比较（对数坐标，归一化）

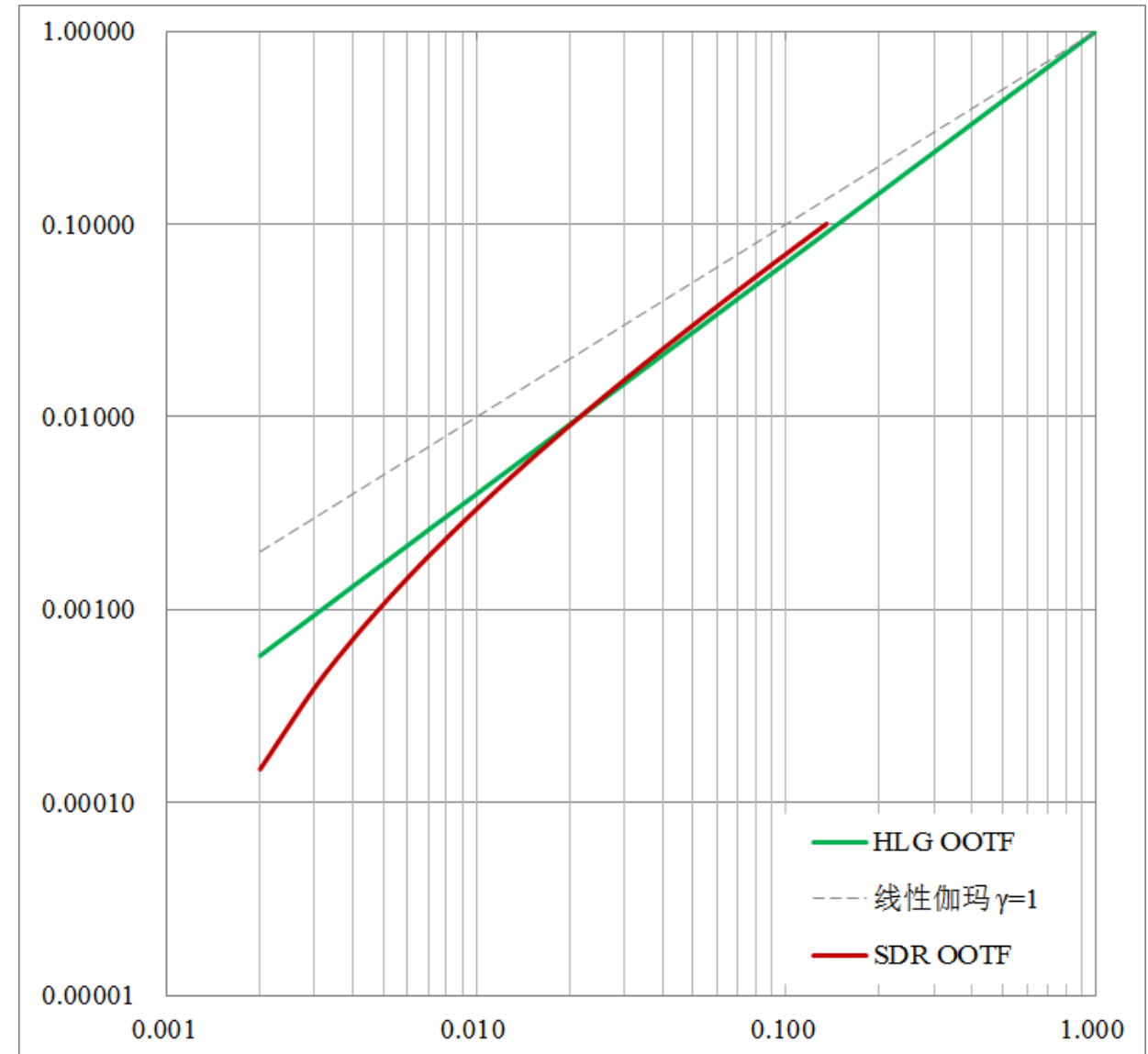
# 场景光参考（SR）与显示光参考（DR）

## SR与DR的差别

- 场景光参考（Scene Referred, 或场景参考映射）保留转换后信号的OOTF
- 显示光参考（Display Referred, 或显示参考映射）保留转换前信号的OOTF



SDR与HLG OOTF特性比较（线性坐标，1000尼特归一化）



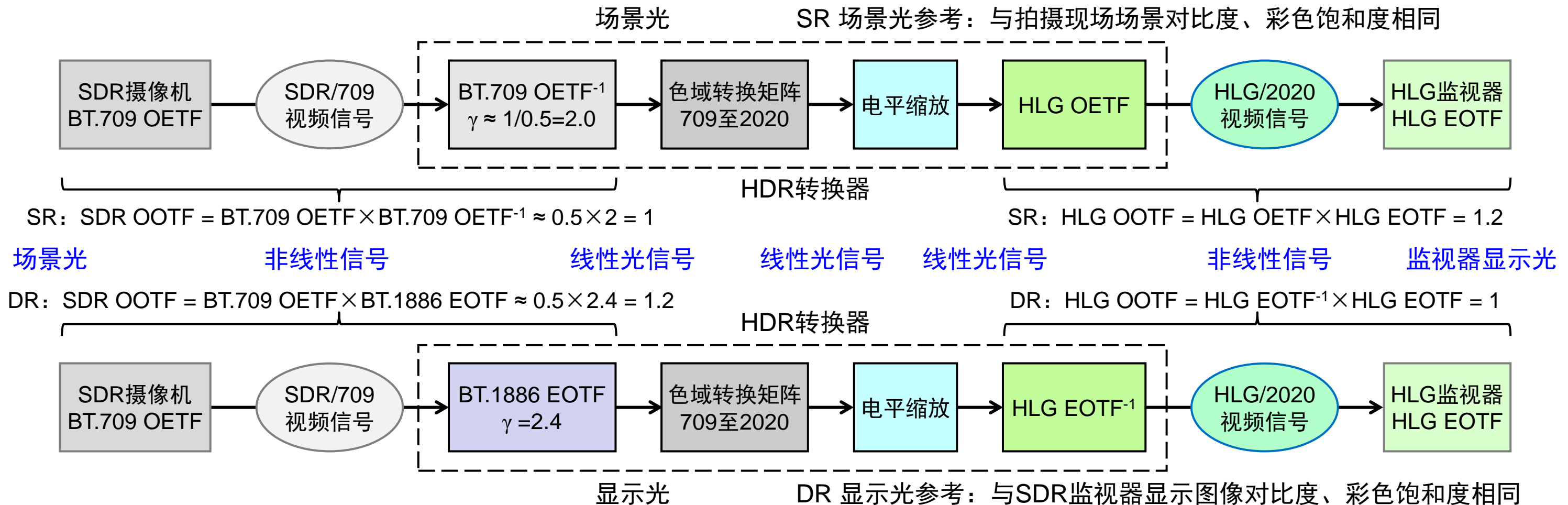
SDR与HLG OOTF特性比较（对数坐标，1000尼特归一化）

# SDR上转换HDR时场景光参考与显示光参考的差别

□ SDR上转换HDR时，首先把非线性的SDR信号转换成线性光信号

■ 由于SDR的OOTF是非线性的1.2，场景光与显示光的对比度、彩色饱和度存在差异

- 用BT.709拍摄伽玛的反函数 BT.709 OETF<sup>-1</sup>（伽玛值2.0）把非线性SDR转换为线性光就是场景光参考或场景参考映射，其对比度、彩色饱和度与拍摄场景相同
- 用BT.1886显示伽玛（伽玛值2.4）把非线性SDR转换为线性光就是显示光参考或显示参考映射，其对比度、彩色饱和度与监视器显示图像相同，比拍摄场景高



# SDR上转换HDR时场景光参考与显示光参考的差别

□可以把SDR上转换HLG想象为用“HLG摄像机拍摄SDR画面”

■ 拍摄实际场景就是SR，拍摄监视器就是DR

□SR上转换

■  $SDR\ OOTF = BT.709\ OETF \times BT.709\ OETF^{-1} \approx 1$ ，相当于用“HLG摄像机拍摄现场场景”

■ 用HLG OETF把线性光信号转换成非线性HLG信号，HLG监视器或电视机中内置的HLG EOTF把非线性HLG信号转换成显示光

➢  $HLG\ OOTF = HLG\ OETF \times HLG\ EOTF = 1.2$ ，显示的HLG图像对比度和彩色饱和度比实际场景高

■ 总系统伽玛= $SDR\ OOTF \times HLG\ OOTF = 1 \times 1.2 = 1.2$

■ 保留了转换后HLG的OOTF

□DR上转换

■  $SDR\ OOTF = BT.709\ OETF \times BT.1886\ EOTF \approx 0.5 \times 2.4 = 1.2$ ，相当于用“HLG摄像机拍摄SDR监视器”

■ 用HLG  $EOTF^{-1}$ 把与SDR监视器对比度、饱和度相同的线性光信号转换成非线性的HLG信号，HLG监视器或电视机中内置的HLG EOTF把非线性的HLG信号转换成显示光

➢  $HLG\ OOTF = HLG\ EOTF^{-1} \times HLG\ EOTF = 1$

■ 总系统伽玛= $SDR\ OOTF \times HLG\ OOTF = 1.2 \times 1 = 1.2$

■ 保留了转换前SDR的OOTF

■ DR上转换时 $SDR\ OOTF = 1.2$ ，如果仍然用HLG OETF把线性光信号转换成非线性HLG信号，则 $HLG\ OETF \times HLG\ EOTF = 1.2$ ，总系统伽玛= $SDR\ OOTF \times HLG\ OOTF = 1.2 \times 1.2 = 1.44$ ，相当于HDR转换时“显示”了两次而不是“显示一次拍摄一次”，不符合总系统伽玛=1.2的基本规则

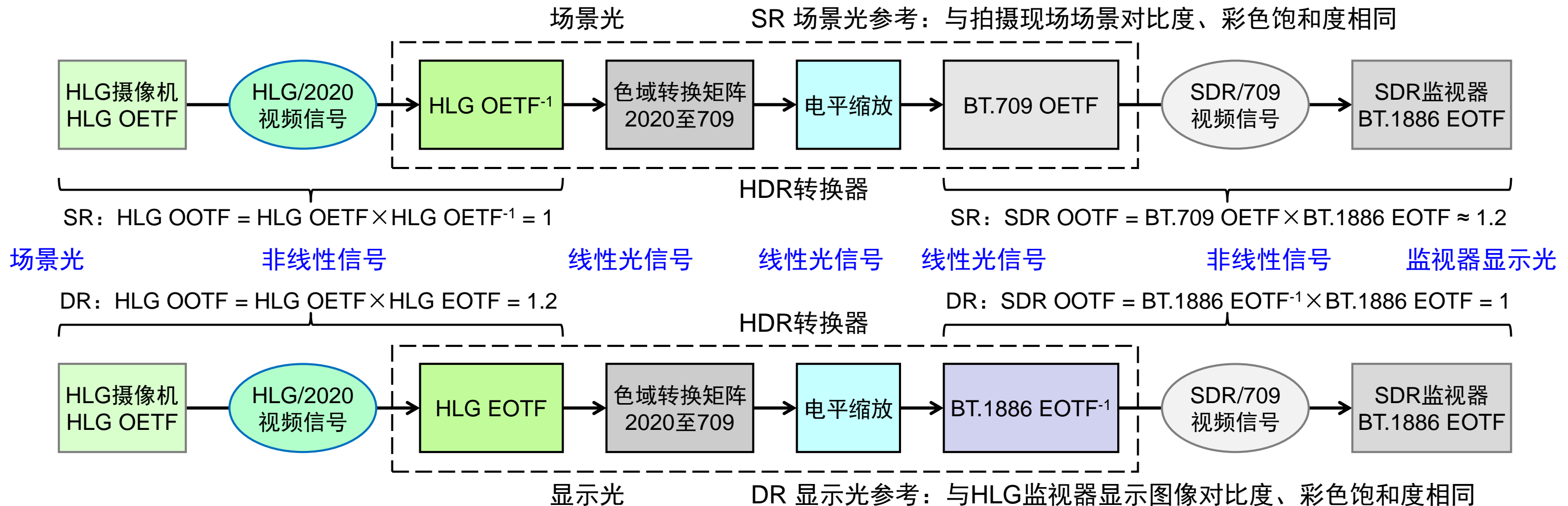
➢ 必须用HLG  $EOTF^{-1}$ 抵消HLG监视器或电视机中内置的HLG EOTF，保留转换前的SDR OOTF

# HDR下转换SDR时场景光参考与显示光参考的差别

□ HDR下转换SDR时，首先把非线性的HDR信号转换成线性光信号

■ 由于HLG的OOTF是非线性的1.2，场景光与显示光的对比度、彩色饱和度存在差异

- 用HLG拍摄伽玛的反函数HLG OETF<sup>-1</sup>把非线性HLG转换为线性光就是场景光参考或场景参考映射，其对比度、彩色饱和度与拍摄场景相同
- 用HLG显示伽玛把非线性HLG转换为线性光就是显示光参考或显示参考映射，其对比度、彩色饱和度与监视器显示图像相同，比拍摄场景高



# HDR下转换SDR时场景光参考与显示光参考的差别

□可以把HLG下转换SDR想象为用“SDR摄像机拍摄HLG画面”

■ 拍摄实际场景就是SR，拍摄监视器就是DR

□SR下转换

■  $HLG\ OOTF = HLG\ OETF \times HLG\ OETF^{-1} = 1$ ，相当于用“SDR摄像机拍摄现场场景”

■ 用SDR OETF把线性光信号转换成非线性SDR信号，SDR监视器或电视机中内置的SDR EOTF把非线性SDR信号转换成显示光

➢  $SDR\ OOTF = SDR\ OETF \times SDR\ EOTF = 1.2$ ，显示的SDR图像对比度和彩色饱和度比实际场景高

■ 总系统伽玛= $HLG\ OOTF \times SDR\ OOTF = 1 \times 1.2 = 1.2$

■ 保留了转换后SDR的OOTF

□DR下转换

■  $HLG\ OOTF = HLG\ OETF \times HLG\ EOTF = 1.2$ ，相当于用“SDR摄像机拍摄HLG监视器”

■ 用SDR的 BT.1886  $EOTF^{-1}$ 把与HLG监视器对比度、饱和度相同的线性光信号转换成非线性的SDR信号，SDR监视器或电视机中内置的SDR BT.1886 EOTF把非线性的SDR信号转换成显示光

➢  $SDR\ OOTF = SDR\ EOTF^{-1} \times SDR\ EOTF = BT.1886\ EOTF^{-1} \times BT.1886\ EOTF = 1$

■ 总系统伽玛= $SDR\ OOTF \times HLG\ OOTF = 1.2 \times 1 = 1.2$

■ 保留了转换前HLG的OOTF

■ DR下转换时 $HLG\ OOTF = 1.2$ ，因此不能用SDR OETF把线性光信号转换成非线性SDR信号，因为 $SDR\ OETF \times SDR\ EOTF = 1.2$ ，这样总系统伽玛= $SDR\ OOTF \times HLG\ OOTF = 1.2 \times 1.2 = 1.44$ ，不符合总系统伽玛=1.2的基本规则

➢ 必须用 $SDR\ EOTF^{-1}$ 抵消SDR监视器或电视机中内置的SDR EOTF，保留转换前的HLG OOTF

# HDR转换时DR与SR的差别

□ OOTF大于1（OETF与EOTF不是互逆关系）是SR与DR转换产生差别的原因

■ 如果SDR与HLG的OOTF=1（SDR与HLG的OOTF互为逆函数），则SR与DR完全相同，没有差别

□ 亮度、对比度和饱和度

■ 虽然SDR与HLG的OOTF都是1.2，但SDR监视器的峰值亮度是100尼特，HLG监视器的峰值亮度1000尼特，是SDR的10倍

■ 同样的非线性特性在低亮度SDR监视器上对对比度和饱和度的影响比高亮度HLG监视器更大

➢ HDR转换后保留SDR OOTF时图像的对比度和饱和度会比保留HLG OOTF时高

➢ 由于彩色图像的对比度和饱和度同时改变时人眼对彩色的变化更敏感，直观感觉就是HDR转换后保留SDR OOTF时彩色饱和度更高

➢ 可以从理论计算和客观测试、主观评价得到验证

□ 电平映射关系

■ 根据ITU的BT.2390和2408建议，HLG与SDR互转时以75%HLG映射100%SDR电平为基准

➢ 不做任何黑电平、白电平、饱和度调整

□ 上转换

■ DR上转换的HLG图像与原SDR图像观感相同，SR上转换的HLG图像与原SDR图像观感有差别

➢ 上转换后SR比DR彩色饱和度低一些

➢ 原因：SR上转换时保留了HLG OOTF饱和度下降，DR上转换时保留了SDR OOTF饱和度不变，所以上转换后SR的饱和度比DR低

# HDR转换时DR与SR的差别

## □下转换

- DR下转换的SDR图像与原HLG图像观感相同，SR下转换的SDR图像与原HLG图像观感有差别
  - 下转换后SR比DR的彩色饱和度高一些
  - 原因：SR下转换时保留了SDR OOTF饱和度上升，DR下转换时保留了HLG OOTF饱和度不变，所以下转换后SR的饱和度比DR高

## □往返转换

- DR上转换+DR下转换：与原始SDR图像相比无变化
  - 原因：DR上转换时保留了SDR OOTF饱和度不变，DR下转换时保留了HLG OOTF饱和度不变，上、下转换时饱和度都没有变化，所以DR往返转换后饱和度不变
- SR上转换+SR下转换：与原始SDR图像相比无变化
  - 原因：SR上转换时保留了HLG OOTF饱和度下降，SR下转换时保留了SDR OOTF饱和度上升，SR下转换时提高的饱和度补偿了SR上转换时降低的饱和度，所以SR往返转换后饱和度没有变化
- DR上转换+SR下转换：与原始SDR图像相比饱和度增加，色调略有变化
  - 原因：DR上转换时保留了SDR OOTF饱和度不变，SR下转换时保留了SDR OOTF饱和度上升，所以往返转换后饱和度上升
- SR上转换+DR下转换：与原始SDR图像相比饱和度降低，色调略有变化
  - 原因：SR上转换时保留了HLG OOTF饱和度下降，DR下转换时保留了HLG OOTF饱和度不变，所以往返转换后饱和度降低

□映射关系改为100%SDR映射79%HLG（75%HLG映射90%SDR）电平时结果相同

SDR709上转HLG2020 SR

100%SDR电平上转HLG

SDR709上转HLG2020 DR

HLG2020下转SDR709 SR

50%HLG电平下转SDR

HLG2020下转SDR709 DR

SR上转+DR下转

SR上转+SR下转

DR上转+SR下转

DR上转+DR下转

SR上转+DR下转

DR上转+SR下转

SR上转+SR下转

DR上转+DR下转

# HDR转换时DR与SR的差别

## □ 实际制作流程

- 用SDR调光制作HDR时摄像机输出的高清SDR图像用于调光，而摄像机内置下转换是SR
- 为确保电视直播制作“所见即所得”，播出端下转换应采用SR，与摄像机内置下转换相同
- 因为SR下转换时彩色饱和度增加，上转换时彩色饱和度降低，应适当调整转换器的饱和度

## □ 往返转换时应尽可能采用相同的映射方式

- 映射方式不同时（DR上+SR下或SR上+DR下）与原图像相比转换后的图像会产生可察觉的彩色变化

## □ HDRC-4000

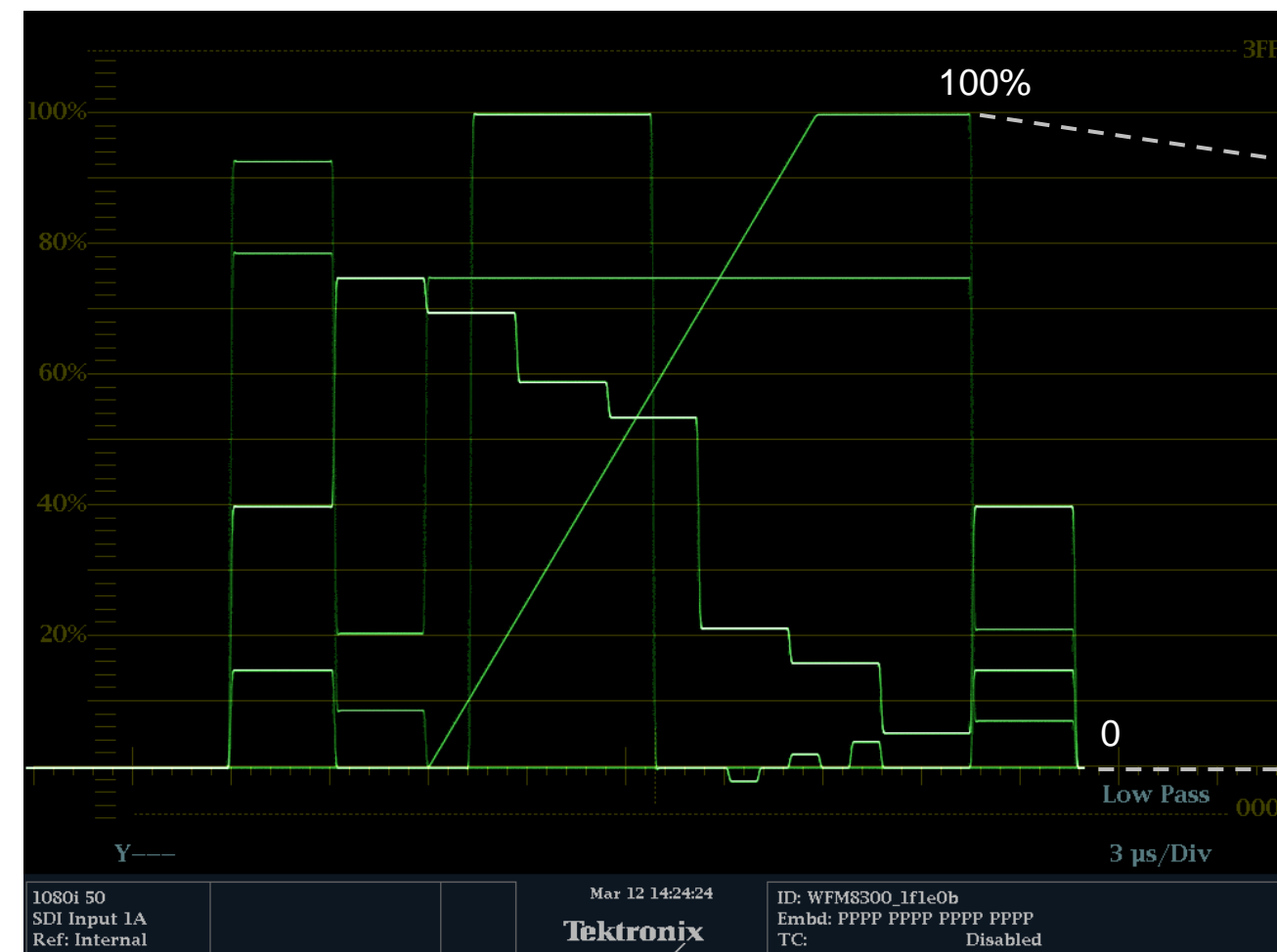
- SR下转换时对超过100%饱和度的彩色做了削波处理，消除了DR上+SR下往返转换时饱和度超过100%的问题
- AIR Matching对SR上、下转换的饱和度变化进行了补偿，但仍需调整上转换饱和度+5、下转换饱和度-5，才能使转换后的图像与原图像观感一致
- 采取上述措施后SR转换性能几乎与DR相同，可适合所有单向与往返转换要求
- V2.3.1新增了HDR LOOK，包括LIVE、MILD和NATURAL
  - MILD进一步减小了DR上+SR下往返转换时饱和度增大的问题，扩展了往返转换组合的灵活性



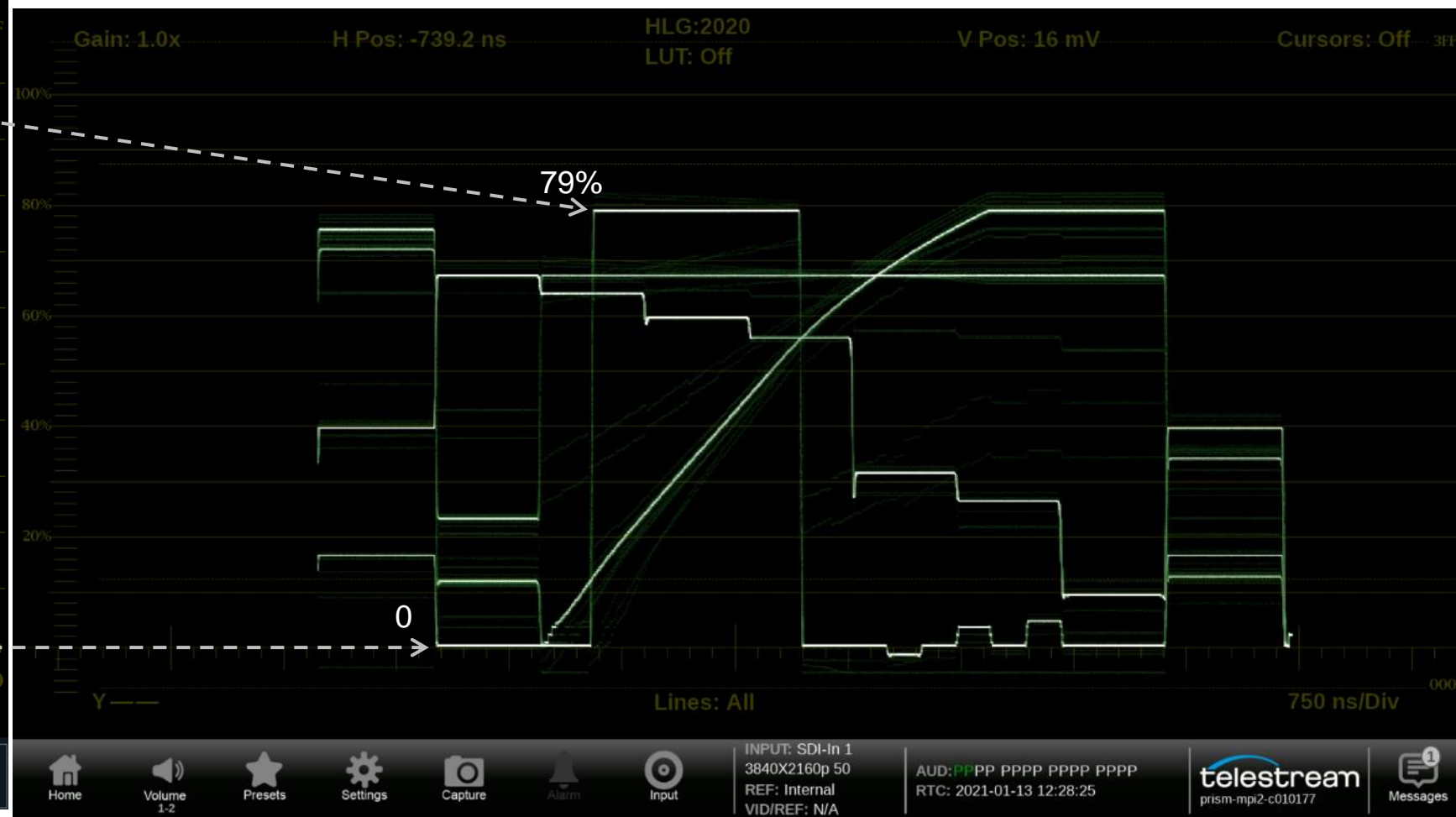
# 映射关系 - 上转换

□ 输入：RP219 SDR彩条

■ 映射关系：100%SDR映射79%HLG = 90%SDR映射75%HLG



HD SDR



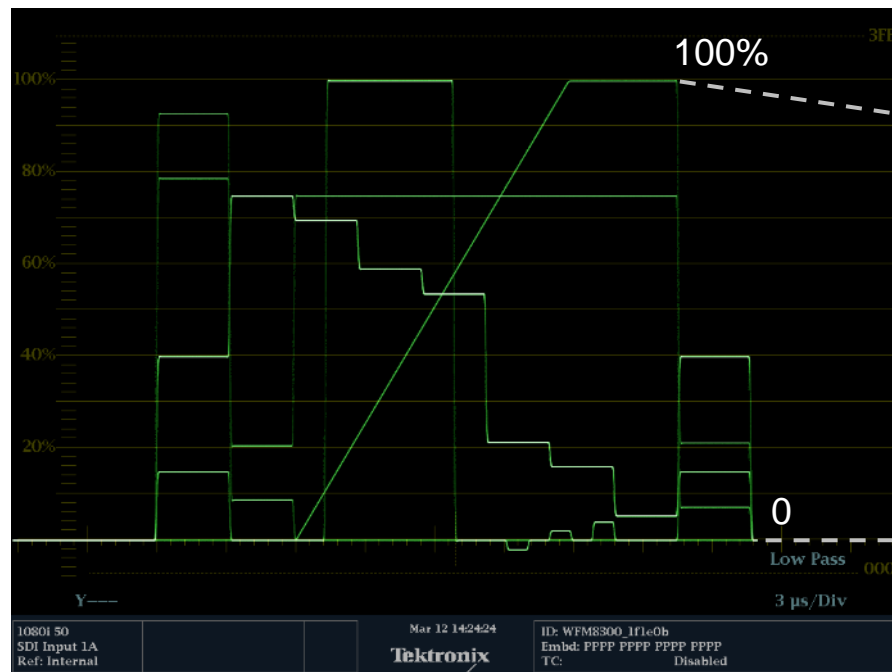
4K HLG

# 映射关系 – SR往返转换

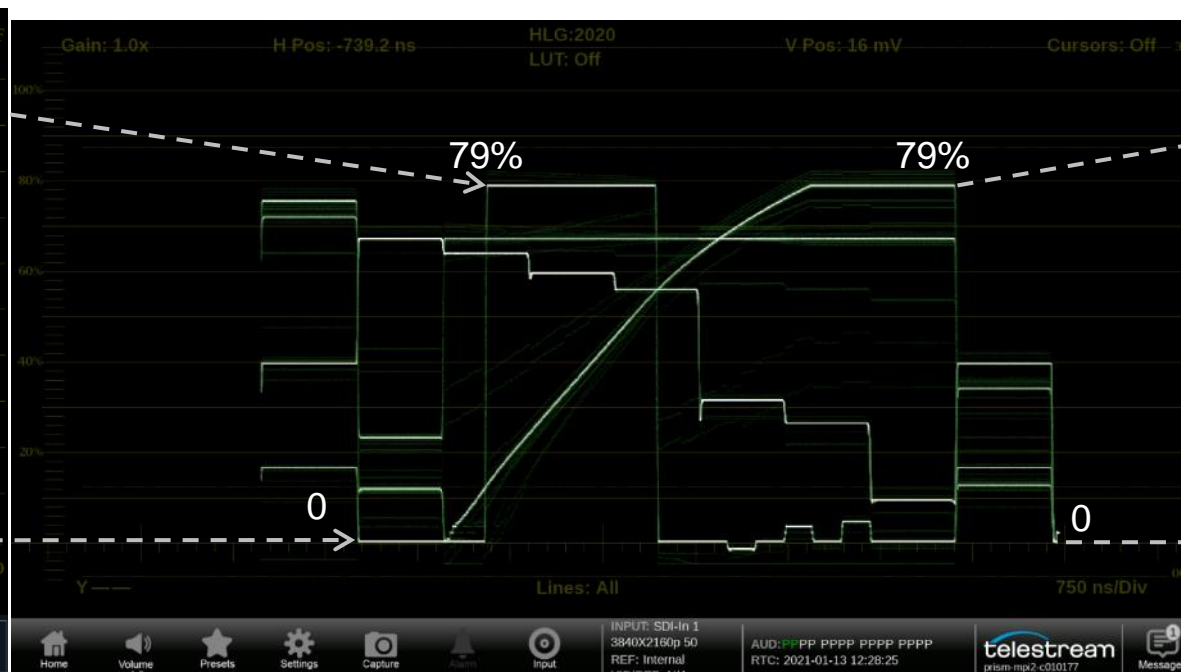
□输入：RP219 SDR彩条

■映射关系：上转换100%SDR映射79%HLG = 90%SDR映射75%HLG

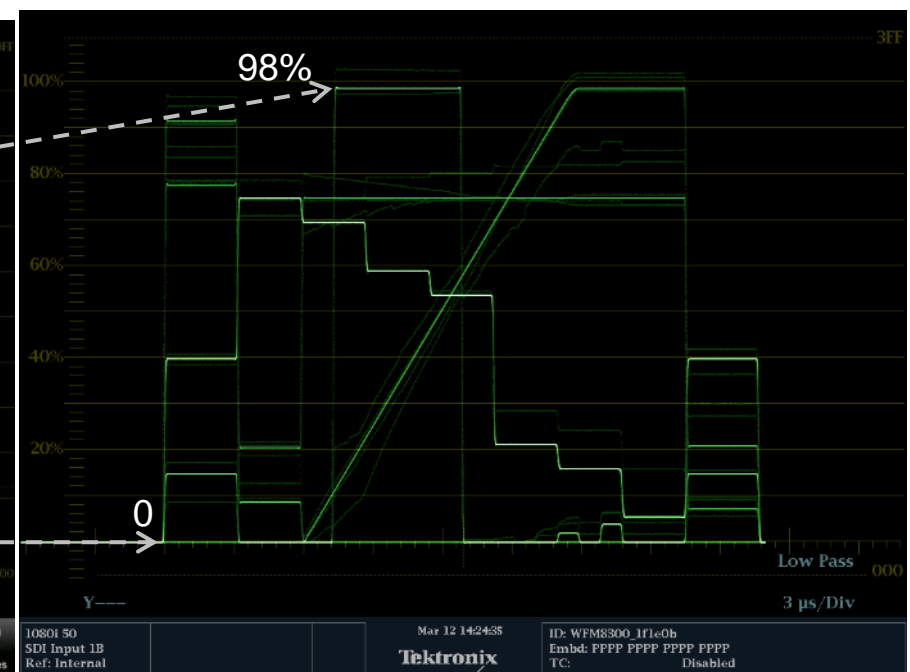
■下转换79%HLG映射100%SDR（拐点关闭。打开拐点时100%电平被拐点压低到98%）



HD SDR



4K HLG



HD SDR

# 转换器类型 – 技术型

## □以ITU相关技术文献为基础

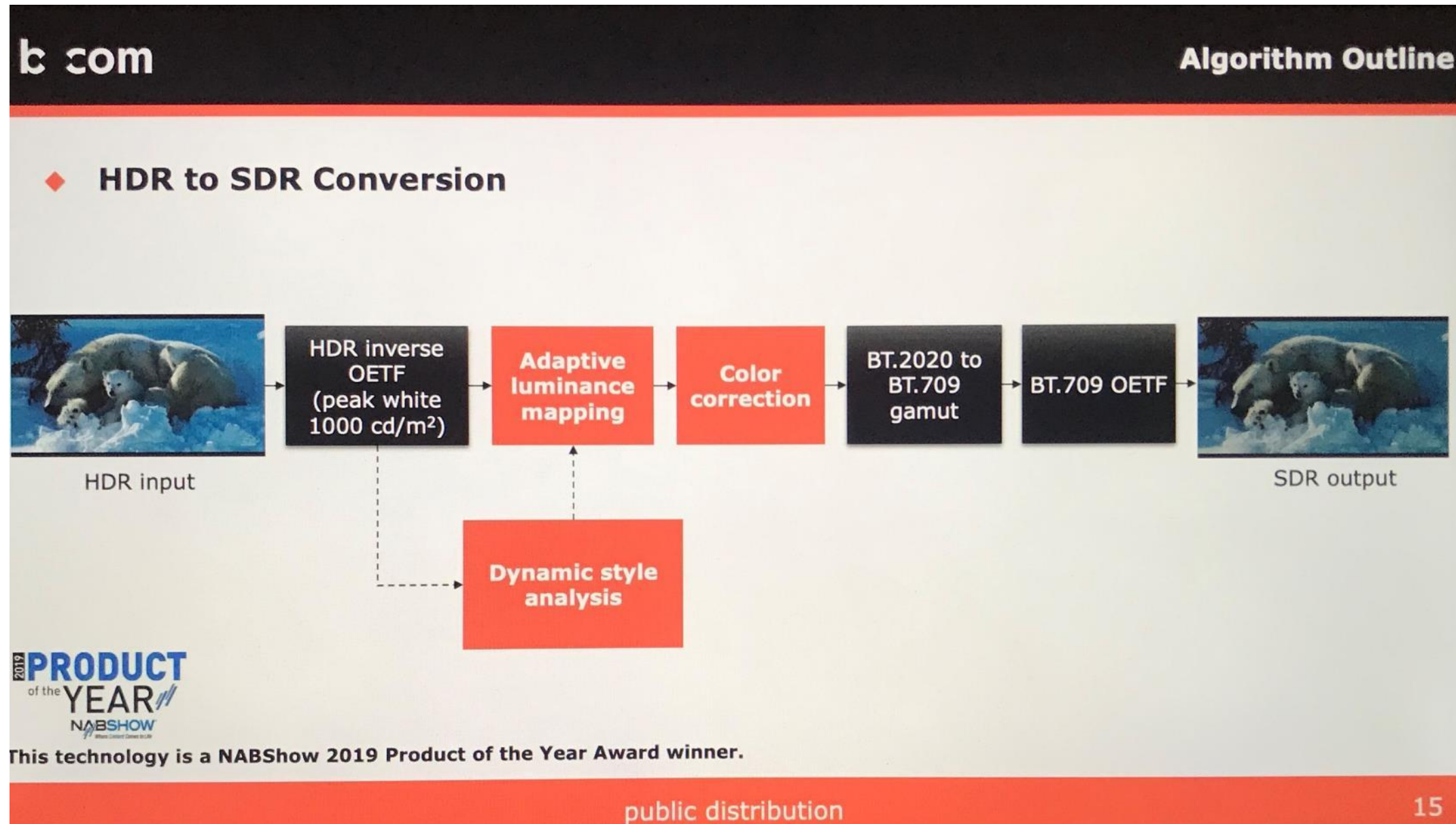
- 转换方法基于BT. 2087、2390、2407、2408、2446等文件推荐的OETF、EOTF、动态范围、色域转换法
- 以技术逻辑为主，艺术逻辑为辅
- 所有转换都是计算的结果，所有计算都有理论依据
  - 根据场景参考、显示参考、色调映射、色域矩阵转换的计算得到输出
- 需要根据需求设置正确的参数，典型的工程师思维

## □代表机型

- SONY HDRC-4000（单机，内置2个模块），固定参数转换
- FOR-A FA-9600（单机，内置1个模块），固定参数转换
  - 与HDRC-4000相同：DR与DR相同，SR与SR相同，可选购加载LUT、AIR Matching
- Imagine SNP（单机，内置8个模块），固定参数转换
  - 与HDRC-4000相同：DR与DR相同，SR1与SR相同，SR2与4000 SR AIR Matching ON相同
- GV KudosPro UHD1200（单机），固定参数转换，可加载LUT
- AXON Neuron-NPH1616：采用B<>COM技术授权的自适应动态参数上、下转换
- 新奥特 DynaHDR：自适应动态参数下转换，可加载LUT
- 索贝 VISION HDR：自适应动态参数下转换

# 附录： B<>COM的自适应可变参数HDR转换示意图

从转换流程可以看到，这是采用了自适应动态参数分析映射，基于场景光参考（SR）的下转换



# 转换器类型 – 艺术型

## □ 以人眼视觉感受为基础

- 转换结果基于艺术家的体验，从调色师的视角处理动态范围、伽玛和色域转换
- 以艺术逻辑为主，技术逻辑为辅
- 无需复杂设置，典型的艺术家思维

## □ 代表机型

### ■ AJA FS HDR

- 技术授权：Colorfront
- 自适应上、下转换，可加载LUT

### ■ PESA Cobalt 9904-UDX-4K（板卡）

- 技术授权：Technicolor
- 自适应上、下转换，可加载LUT

## □ 转换器硬件只是数据处理平台和信号接口，与HDR转换性能无关

- 设备性能取决于核心的信号处理引擎

# HDR转换用3D-LUT

## □ LUT是一个包含多组参数的转换方案文件

- 融合了经验丰富的工程师或艺术家对动态范围、色域转换的理解和处理方法，属于软件产品
- 支持LUT上载的转换器、非线性制作系统可加载适合不同应用场合的LUT实现用户需要的转换
- 转换器、非线性制作系统加载LUT后其转换特性完全由LUT决定

## □ LUT提供方

- 广播电视行业
  - BBC：研发部门经过大量测试和实践后制作了一组LUT，适合不同的HDR转换应用，最新版本V1.4，付费购买
  - OBS（Olympic Broadcasting Services，奥林匹克广播服务公司）：为规范奥运转播商HLG-SDR转换提供了3个LUT（2个场景光参考，1个显示光参考），最新版本V02
  - CMG（中央广播电视总台）：为规范台内HLG-SDR转换提供了2个场景光参考LUT，目前为测试版本
- 影视制作行业
  - 设备供应商、调色工作室、调色师为培训与交流制作的HDR转换用LUT

## □ LUT使用方

- 需要规范HDR转换流程的电视台、制作公司
- 缺少HDR转换经验的调色工作室、调色师

## □ 转换精度

- 大部分3D-LUT转换都是33-cube（33-grid），更高的精度LUT文件太大，很多硬件不支持

## □ 支持加载LUT的转换器

- 大多数转换器产品支持加载LUT，有些转换器（如GV的XIP-3901、UHD1200等）产品设计以LUT转换为主

## □ LUT的控制范围

- HDR转换器功能：分辨率转换、隔行-逐行扫描格式转换、伽玛转换、色域转换、电平映射（电平缩放）
- LUT只与伽玛转换、色域转换、电平映射有关，与分辨率、扫描格式转换质量无关

# 不同转换器的特点

## □ 静态固定参数转换

- 相当于“专业单反相机”，所有参数均可由用户自行调整，实现精准控制
- 使用者需具备专业知识，了解各项技术参数对图像的影响。正确设置可获得优质图像，错误设置会造成图像劣化
- 正确设置后适用于大部分规范制作的HDR节目，但无法保证部分超亮或超暗画面的转换质量

## □ 动态自适应可变参数转换

- 相当于“傻瓜相机”，无需复杂设置即可满足大部分需求
- “理想的”智能处理引擎可实时分析每帧画面亮度，用不同参数处理不同动态范围的图像，获得最佳转换结果

## □ LUT转换

- 相当于“专业单反相机”的各种场景模式，无需复杂设置，只要选择对应场景的LUT就能获得相对优质，至少是错误较少的结果

## □ 专业知识

- 无论采用哪种转换方式，使用者都需要具备一定程度的专业知识
- 固定参数转换需要的专业知识最多，其次是LUT，自适应可变参数转换需要的专业知识最少

# 存在的问题

## □ 静态固定参数转换

- 由于SDR的动态范围比HDR小得多，设置正确的HDR与SDR的映射关系后，大部分规范制作的HDR节目下转换后都能获得理想的图像质量
- 无法保证部分超亮或超暗画面的转换质量
  - 增大转换增益差可改善超亮画面质量但牺牲了超暗；减小增益差则改善超暗牺牲了高亮
- 需要复杂的参数设置，在HDR发展的初期用户使用难度较大

## □ 动态自适应可变参数转换

- 动态参数转换器的智能处理引擎性能正在不断完善，已经开始实际应用
- 部分产品存在的问题
  - HDR画面中没有超亮景物时不使用80%-100%SDR电平，出现超亮景物时用这些电平资源处理超亮信号，其结果是极端曝光的超亮或超暗画面转换效果好，正常曝光图像偏暗，比固定参数转换器低20%左右
  - 不能利用超白部分的电平资源

## □ LUT

- 每个LUT只适合其设计应用的场景，需要改变时只能更换LUT

# HDR转换器测试方法

## □ 需要用客观测试和主观评价全面评估转换器性能

■ 客观测试与主观评价同样重要，不能相互替代

## □ 客观测试

■ 目的

- 根据ITU标准调整转换器设置确定正确的电平映射关系，或了解待测设备与推荐映射电平的差别
  - ❖ 对固定参数转换来说，如果映射关系设置错误测试结果是不可信的
- 根据输入、输出波形/矢量可确认转换器类型，如SR、DR、伽玛等

■ 难点

- BT.2111彩条里的亮度灰阶、斜坡信号只能对伽玛转换做定性判断，无法做定量测试
- 目前可用于下转换色域测试的工具
  - ❖ BT.2111有SR上转的BT.709彩条，3373和规划院版2111彩条有SR与DR上转的BT.709彩条，可用于判断SR、DR下转后矢量是否正确

## □ 主观评价

■ 对动态参数、LUT转换来说主观评价比客观测试更重要

- HLG与高清测试序列的选择非常重要，直接影响测试结果
  - ❖ 测试序列必须包含多种必要的元素，如不同环境中的人脸肤色，室外晴天、阴天、草地、天空、白云、雪景、夜景，室内演播室，低照度、大小光比等

# HDR转换器小结

## □ 静态固定参数转换

- 正确设置后，各品牌转换器都能适用于大部分规范制作的HDR节目，但无法保证部分超亮或超暗画面的下转换质量

## □ 动态自适应可变参数转换

- 极端曝光的超亮或超暗画面表现明显优于固定参数转换
- 有些产品正常曝光的图像偏暗，不如固定参数

## □ LUT转换

- 正确设置量化电平后所有最新版BBC、OBS、CMG LUT的上/下转换都能获得良好的图像质量，包括往返转换

## □ 不同品牌交叉往返转换

- 正确设置后，不同品牌、不同类型的转换器交叉往返转换后都能获得良好的图像质量

# HDR播出（传输方案）

# HDR播出方案

- PQ伽玛曲线精度很高，播出/传输时应加入元数据形成HDR方案才能充分发挥优势
  - 用PQ制作的节目可以用HDR10、HDR10+、Dolby Vision、SL-HDR1/2、HDR Vivid播出/传输
- HLG无需元数据
  - 用HLG制作的节目在播出/传输码流里加入识别符就可以作为最简单的HDR方案
  - 也可以加入元数据形成HDR方案（如SL-HDR3、Dolby Vision、HDR Vivid）
- HDR播出方案
  - 已经被采用的HDR方案有BDA/HDR10、HDR10+、Dolby Vision, HLG, HDR Vivid（菁彩HDR）

方案	OETF	元数据	下兼容	层
BBC/NHK	HLG	无	Yes	单层
BDA/HDR10	PQ	静态	No	单层
HDR10+	PQ	静态+动态	No	单层
Dolby Vision (BL)	PQ/HLG	静态+动态	No	单层
Dolby Vision (BL+EL)	PQ	静态+动态	Yes(with IP)	双层
SL-HDR1 (Philips/Technicolor)	PQ	静态+动态	Yes	单层
SL-HDR2 (Philips/Technicolor)	PQ	静态+动态	Yes(with IP)	单层
SL-HDR3 (Philips/Technicolor)	HLG	静态+动态	Yes	单层
HDR Vivid (CUVA)	PQ/HLG	静态+动态	Yes	单层

# 采用PQ的HDR方案比较

## □兼容性

- HDR10、HDR10+、Dolby Vision单层方案不兼容SDR
- HDR10+、Dolby Vision、SL-HDR1/2、HDR Vivid可下兼容HDR10
  - 可以认为HDR10+、Dolby Vision、SL-HDR1/2、HDR Vivid是HDR10的增强版，也可以认为HDR10是上述方案的简化版

## □静态元数据的作用是实现显示适配

- ST2086：监视器硬件性能，包括RGB基色坐标（色域）、白点坐标、最大显示亮度、最小显示亮度
  - 作用：通知显示终端制作母版监视器性能
- 内容亮度信息
  - MaxFALL（maximum frame-average light level，最大帧平均亮度，简称FALL或平均亮度）
  - MaxCLL（maximum content light level，最大内容亮度，简称CLL或最大亮度）

## □动态元数据：各方案不同

- Dolby Vision：ST 2094-10，实现场景适配
- Philips：ST 2094-20，实现HDR-SDR兼容
- Technicolor：ST 2094-30，实现SDR-HDR兼容
- HDR10+：ST 2094-40，实现场景适配
- HDR Vivid：CUVA自定义，优化显示适配、实现场景适配、SDR兼容

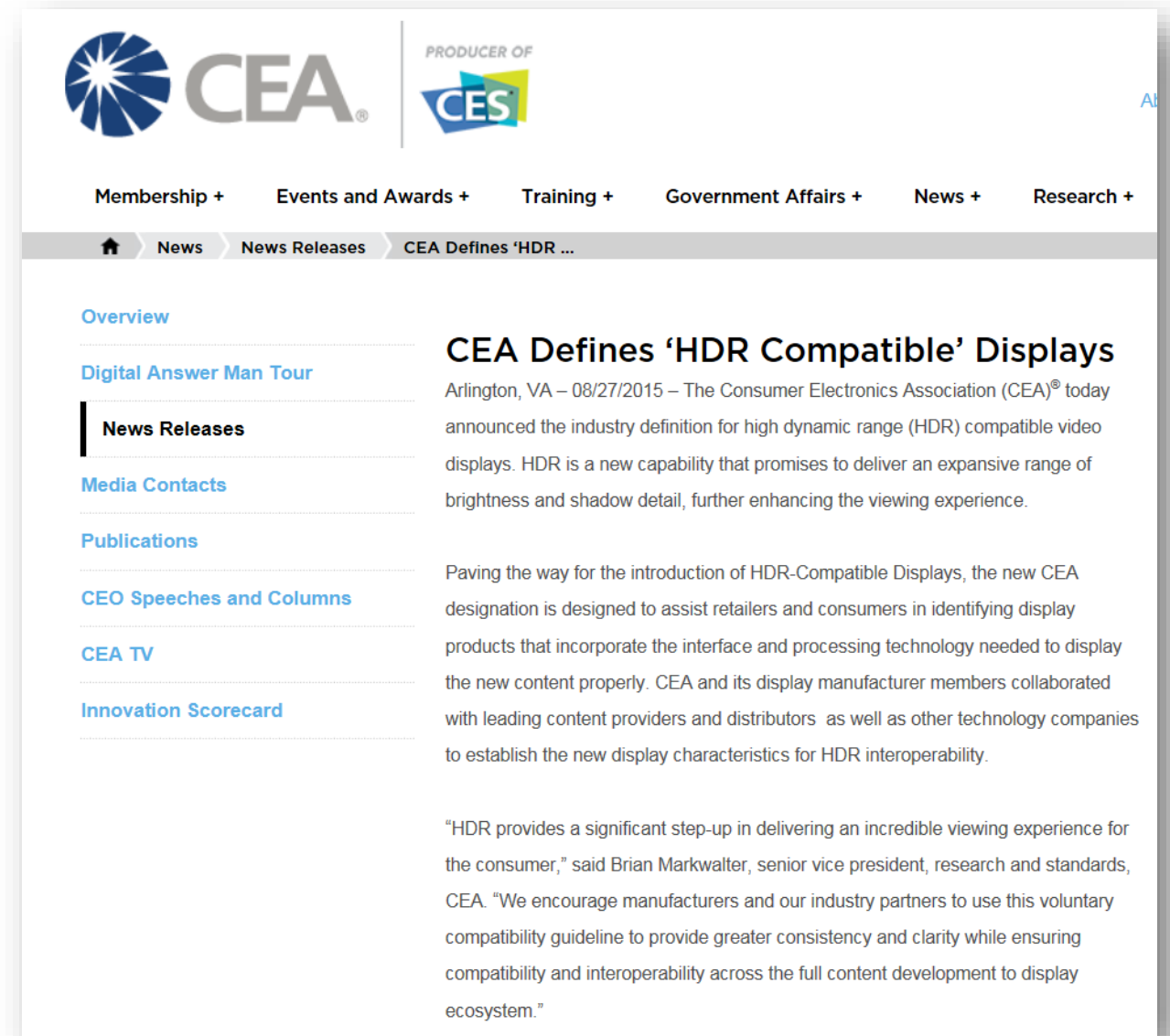
# HDR10

## □ 正式名称：HDR10 Media Profile

- CEA（Consumer Electronics Association, [美国] 消费电子产品协会，现已更名为CTA）发布

## □ HDR10 Media Profile内容

- EOTF： SMPTE ST2084（PQ）
- 彩色取样： 4:2:0（压缩后的视频源）
- 量化： 10比特
- 色域BT.2020
- 静态元数据： SMPTE ST 2086, MaxFALL, MaxCLL



# 超高清蓝光（Ultra HD Blu-ray）

## □ 蓝光盘格式扩展视频

- 编码：HEVC
- 分辨率：3840x2160
- 峰值码率：100Mbps
- EOTF：SMPTE ST2084（PQ）
- 彩色取样：4:2:0
- 量化：10比特
- 色域BT.2020
- 静态元数据：SMPTE ST 2086, MaxFALL, MaxCLL

Blu-ray Format Extension Video Characteristics

Video Codec	HEVC <sup>(1)</sup>		AVC
Spatial Resolution	3840x2160	1920x1080	1920x1080
Picture Format Aspect Ratio	16:9		
Bit Depth – SDR	10		8 <sup>(2)</sup>
Color Space Primaries	BT.2020 <sup>(3)</sup> BT.709 (SDR only)		BT.709 (SDR only)
Color Sub sampling	4:2:0		
Frame Rates	23.976p, 24p, 25p <sup>(4)</sup> , 50p <sup>(4)</sup> , 59.94p, 60p		23.976p, 24p
Peak Video Bit rate <sup>(5)</sup>	100Mbps		40Mbps
Bit Depth - HDR	10		N/A
HDR EOTF	SMPTE ST 2084		
Static Metadata	SMPTE ST2086, MaxFALL (HDR only) <sup>(6)</sup> , MaxCLL (HDR only) <sup>(6)</sup>		

<sup>(1)</sup>Main 10 High Tier Level 5.1. NOTE: in the mandatory part, HDR content is transmitted using a single layer codec with metadata in SEI messages.

<sup>(2)</sup>AVC 8-bit BT.709 SDR is allowed only for 1080/23.976p and 1080/24p frame rates and with a peak bit rate that is within existing BD specification

<sup>(3)</sup>BT.2020 uses the YCbCr non-constant luminance format

<sup>(4)</sup>Decoding 25Hz and 50Hz video is BD-ROM Player mandatory if a 50Hz TV system is used

<sup>(5)</sup>Peak Video Bitrate is constrained by the relevant ISO/IEC HRD conformance and by the MPEG-TS T-STD decoder buffer input rate

<sup>(6)</sup>See following slides for description of MaxFALL and MaxCLL metadata

NOTE:

BDA Authoring Guideline for HDR Content will be prepared to include the following recommendation text: "Maximum Frame Average Light Level" not to exceed 400nits. Over 1000 nits should be limited to specular highlights which are expected to be a small percentage of the picture area.

SD resolution and 3D (MVC) video are not included. HDR Video optional functions under study in BDA.

ST 2084 : High Dynamic Range Electro-Optical Transfer Function of Mastering Reference Displays (published as of September 2014)

ST 2086: Mastering Display Color Volume Metadata Supporting High Luminance and Wide Color Gamut Images (published as of November 2014)

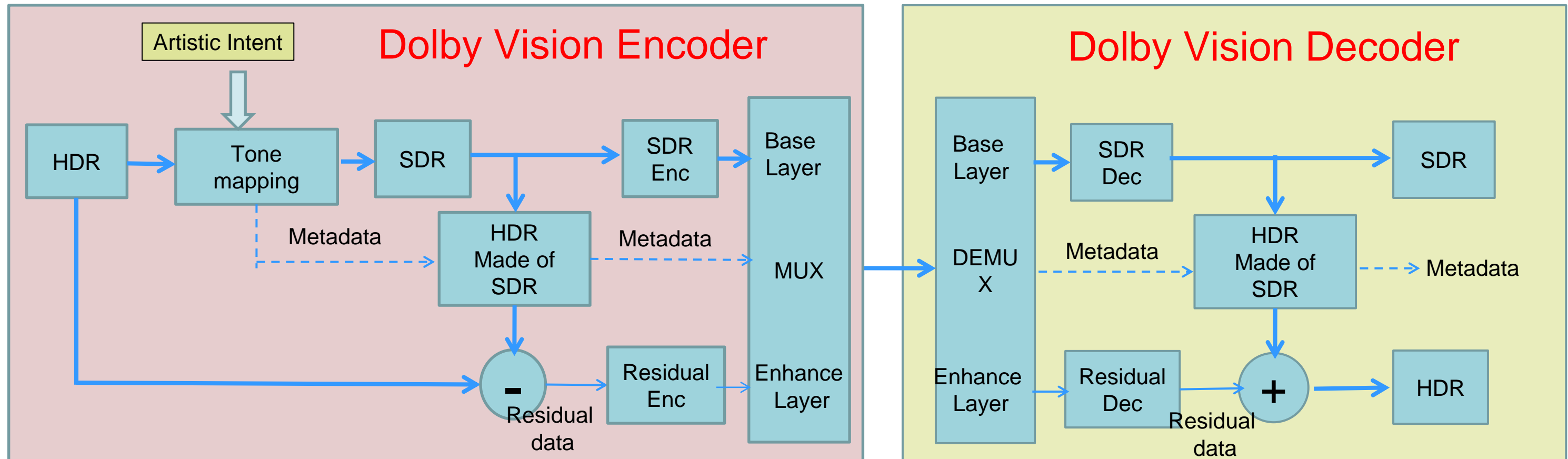
注：蓝光盘既有HDR10，也有Dolby Vision格式

# SDR兼容-双层数据传输

## □ Dolby Vision (杜比视界)

■ PQ 母版经Dolby Vision编码后分成两层传输 (卫星/地面无线/有线电视/网络等)

- 用于普通电视的基本层: 不支持HDR的电视机、终端可直接解码基本层信息, 显示对比度和彩色正常的SDR图像
- 包括HDR信息的增强层: 支持Dolby Vision的电视机、终端检测到码流中的元数据后自动转入Dolby Vision模式, 可解码基本层和增强层的全部信息并重建HDR图像



# SDR兼容-单层数据传输

- PQ母版，播出/传输码流中插入元数据：HDR10、HDR10+
  - 支持HDR10或HDR10+的电视机、终端检测到元数据后自动转入HDR模式显示HDR图像
    - 支持HDR的电视机、终端未检测到HDR元数据时默认SDR模式，可显示对比度和彩色饱和度正常的SDR播出图像
  - 不支持HDR的电视机、终端上显示对比度、彩色不正常的灰暗、褪色图像
- PQ母版，播出/传输码流中插入元数据：SL-HDR1
  - SL-HDR1编码器把PQ转换成SDR图像+动态元数据传输
    - 支持SL-HDR1的电视机、终端检测到元数据后可用元数据在SDR的基础上重建HDR图像
  - 不支持HDR的电视机、终端能显示对比度和彩色正常的SDR图像
- PQ母版，播出/传输码流中插入元数据：SL-HDR2
  - SL-HDR2编码器把PQ转换成HDR图像+动态元数据传输
    - 支持SL-HDR2的电视机、终端检测到元数据后自动转入HDR模式显示HDR图像；可用元数据在HDR的基础上重建SDR图像
  - 不支持HDR的电视机、终端上显示对比度、彩色不正常的灰暗、褪色图像
- PQ母版，播出/传输码流中插入元数据：HDR Vivid
  - HDR Vivid编码器把PQ转换成HDR图像+动态元数据传输
    - 支持HDR Vivid的电视机、终端检测到元数据后用元数据优化显示适配、实现SDR兼容、场景适配
  - 不支持HDR的电视机、终端上显示对比度、彩色不正常的灰暗、褪色图像
- HLG母版，插入静态元数据传输：SL-HDR3、HDR Vivid
  - 支持SL-HDR3、HDR Vivid的电视机、终端检测到元数据后自动转入HLG模式显示HDR图像，静态元数据实现显示适配
  - 不支持HDR的电视机、终端上显示对比度略有下降、彩色饱和度降低的SDR图像
- HLG母版，播出/传输码流中插入识别符：HLG
  - 支持HLG的电视机、终端检测到HLG识别符后自动转入HLG HDR模式，显示HDR图像
    - 支持HDR的电视机、终端未检测到HLG识别符时默认SDR模式，可显示对比度和彩色饱和度正常的SDR播出图像
  - 不支持HDR的电视机、终端上显示对比度略有下降、彩色饱和度降低的SDR图像

# 4K HDR播出流程

## □ 播出/传输用PQ制作的节目时必须同时传输元数据

- 支持HDR的电视机、终端接收到元数据后自动进入HDR模式

## □ 播出/传输用HLG制作的HDR节目时必须同时传输HLG识别符

- 支持HLG的HDR电视机、终端接收到HLG识别符后自动进入HDR模式

- 依据HLG系统伽玛计算公式，电视机厂商应为不同亮度的HLG电视机设置不同的系统伽玛值，可变伽玛自动调整电视机平均亮度，使不同亮度电视机显示的肤色亮度基本相同

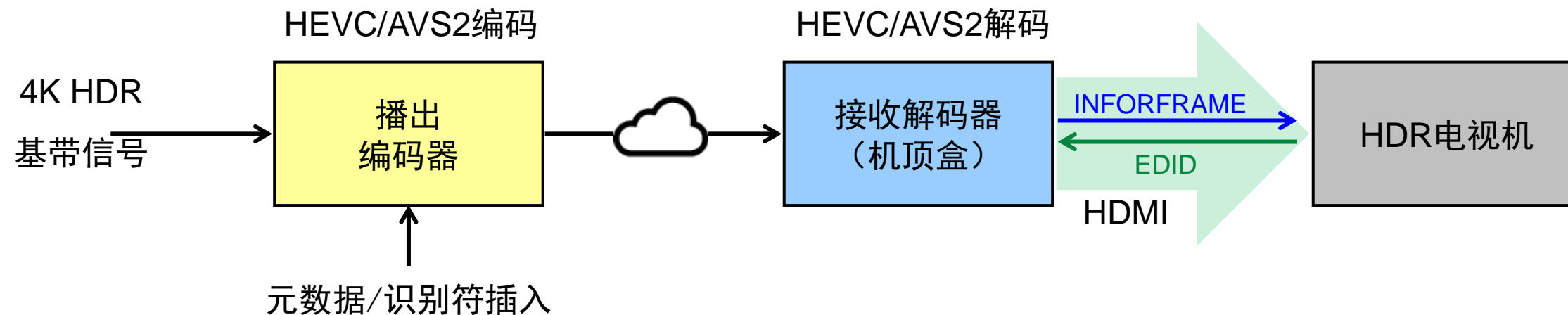
## □ HDMI连通

- 机顶盒连接电视机或显示设备后，通过HDMI发送Infoframe（信息帧）通知电视机正在传输的图像信号参数

- 电视机接收到Infoframe后，会把电视机硬件支持的信号格式通过EDID（扩展显示识别数据）回复机顶盒

- 通过HDMI的Infoframe和EDID通讯后，双方判断能否直接显示传输信号

- 电视机性能支持传输信号的需求时机顶盒透传数据，所有信号处理都由电视机完成
- 电视机不支持传输信号的要求时，机顶盒应该根据电视机性能将传输信号转换成电视机能够显示的图像格式



# HDR制作需要注意的问题

# HLG

## HLG与SDR的制播流程相同

- 既不产生也不传输元数据，电视机和显示终端无法获得节目源属性信息实现自动设置、适配
- HLG与SDR的制播流程采用约定模式，必须事先约定拍摄、制作和显示设备的性能才能正确再现画面



# PQ

## □ PQ与SDR的制作、播出流程差别很大

### ■ 几乎所有PQ节目都是用非实时调色流程制作的

- PQ制作/调色时监视器的峰值亮度、量化电平、色域有更多选择，与HLG制作时只有HLG伽玛+BT.2020色域一种组合相比，PQ制作时不同峰值亮度+不同色域+不同量化电平（全域/窄域）的组合比HLG多得多
- PQ制播流程采用通知模式，制作、播出/分发用PQ制作的节目时必须记录并传输能够准确描述调色监视器性能的静态元数据，使接收端显示设备能获得节目源属性并自动控制显示设备的设置与之适配



# 窄域（Narrow Range）与全域（Full Range）

□ 用编码值表达 $Y'$ 、 $R'G'B'$ 、 $C'_B$ 、 $C'_R$ 电平的方式有窄域或全域两种

■ 10比特量化

- 窄域：代表黑色最低亮度的编码值为64，代表白色最高亮度的编码值为940
- 全域：0和1023（文件存储）或4和1019（SDI传输）
- HLG与SDR只用窄域，PQ既用窄域也用全域

□ 当信号源端与显示端采用的电平表达方式相同时显示设备能够正确再现图像

□ 信号与显示端采用不同的电平表达方式时，再现图像的暗部和亮部就会出现“不黑不白”或“缺黑少白”的现象

■ 信号源端窄域、显示端全域时不能显示纯黑，原有的黑色暗部显示为暗灰，而且原有的高光不够亮

- 为SDR/HLG电视和电影制作的节目电平都是窄域，这些图像在电脑、平板、手机终端上显示时如果没有把窄域电平映射成全域就会出现“不黑不白”的现象

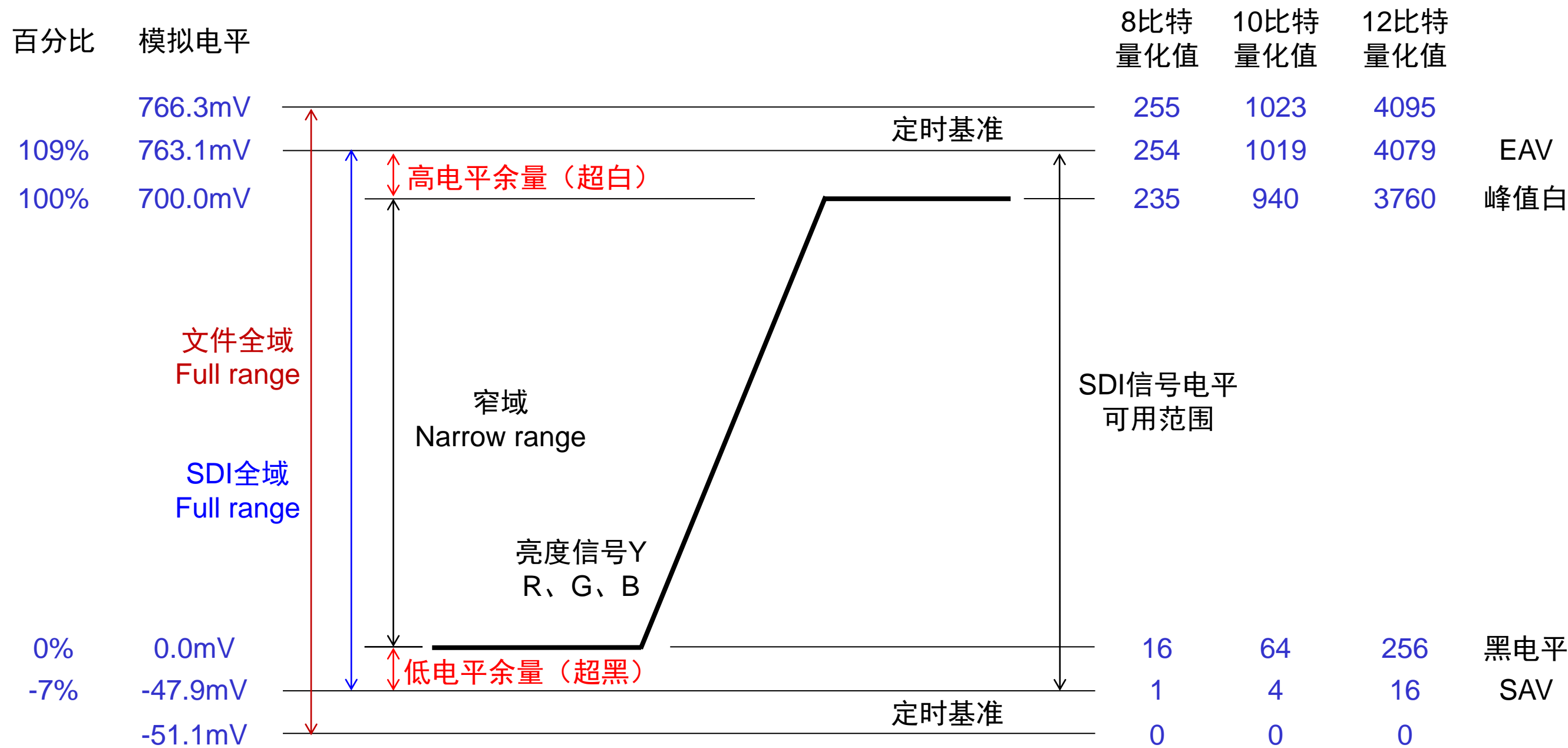
■ 信号源端全域、显示端窄域时纯黑部分缺失，原有的暗部层次无法显示，而且高亮部分缺失，原有的高光层次无法显示

- 电脑、平板、手机等显示屏默认全域，SDR和HLG监视器/电视、电影放映机默认窄域，为电脑、平板、手机制作的节目在电视机上显示时如果没有把全域电平映射成窄域就会出现“缺黑少白”的现象

■ 因此，采用PQ制作时必须确保母版与显示设备的电平表达方式相同才能正确再现图像

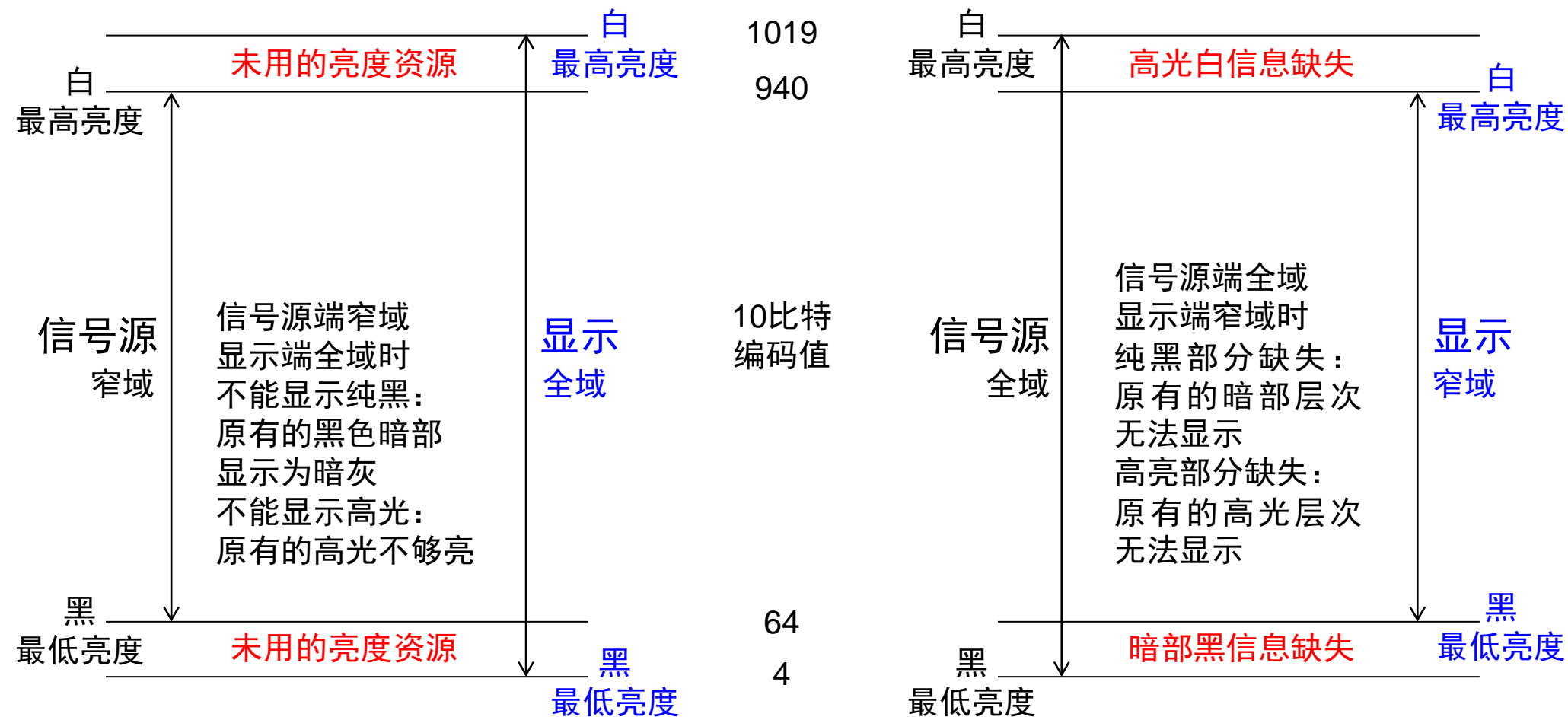
- 目前，HDMI可以传输电平表达方式的元数据，SDI的VPID还没有电平表达方式的规范

# 量化值与电平的关系



# 信号源端与显示端电平表达方式不同时出现的问题

- 直播系统应在前端输入BT.2111测试信号，输出端用波监检查超黑与超白电平表达是否正确
- 非线性制作设备输入、输出文件时应使用BT.2111测试信号文件检查电平表达设置是否正确
  - 关注结果，而不是设置参数
    - 不同厂商、不同型号设备设置“全域”、“窄域”或“窄域+超黑+超白”时其内涵并不相同，需要输入或记录并输出BT.2111窄域HLG彩条信号检查、确认设置是否正确



# 用LUT实现HDR转换时的设置

## □ 选择符合使用需求的LUT并上传到转换器或非线性制作系统

- 由于内存容量限制，大部分HDR转换器只支持33-Cube 3D-LUT，非线性制作系统可能支持精度更高的65-Cube 3D-LUT
- 在转换器操作界面上选择需要使用的LUT，或在非线性制作系统上加载需要使用的LUT

## □ 根据使用的LUT功能设置转换器或制作系统的输入、输出信号格式（HLG-SDR转换）

- 包括：分辨率、扫描格式、帧率、信号域（伽玛、色域）
  - 上转换：输入信号1920×1080i（隔行扫描），每秒25帧/50场，窄域（BT.709伽玛，BT.709色域）  
输出信号 3840×2160P（逐行扫描），每秒50帧，窄域（HLG伽玛，BT.2020色域）
  - 下转换：输入信号3840×2160P（逐行扫描），每秒50帧，窄域（HLG伽玛，BT.2020色域）  
输出信号1920×1080i（隔行扫描），每秒25帧/50场，窄域（BT.709伽玛，BT.709色域）

## □ 选择与LUT适配的电平表达方式

- 使用LUT前应仔细阅读相关文档并根据说明正确设置电平表达方式
- 不同的LUT都是按其应用场景设计的，这些与设备相关的场景既有全域也有窄域
- LUT文件只管理输入与输出电平的映射关系，实际输出电平是由加载LUT转换器的接口设置确定的
  - 假设某LUT是基于全域电平设计的，如果转换器设置为窄域表达电平就会出现误差
  - 不同厂商的转换器只有在其电平表达设置与LUT设计相符的情况下才能确保获得LUT设计者期望的特性
  - 在设置正确的情况下无论哪个厂商的转换器产品加载相同LUT后其HDR转换性能是完全相同的

# 用LUT实现HDR转换时的设置

## □ 实际应用

### ■ BBC根据不同的电平表达方式把LUT分为3类

- TYPE I只处理窄域内的内容，即使输入信号包括了窄域之外的内容也全部放弃
- TYPE II处理全域内容但输出HLG时压缩为窄域
- TYPE III也是处理全域内容，与TYPE II的差别是输出不做电平缩放，而是用全域处理包括超黑和超白在内的所有窄域内容
- 有些转换器的电平表达方式设置直接对应BBC的3种类型

### ■ OBS提供了3个HLG-SDR转换LUT

- 每个LUT都有TYPE A和TYPE B两个版本，TYPE A用于窄域设置，TYPE B用于全域设置
- 如果加载了TYPE A文件但转换器设置为全域，其转换特性就会与同样加载了TYPE A文件但设置为窄域的设备特性不同

### ■ CMG提供了2个HLG-SDR转换LUT（映射关系参见总台白皮书及附件）

- CMG LUT的设计是用全域处理包括超白在内的所有窄域内容，因此使用CMG LUT时转换器或制作系统应设置为全域（例如，UHD1200转换器应设置为TYPE III）

## □ 检查

### ■ 设置完成后应使用总台白皮书附件推荐的检查方法确认电平映射关系

- 下转换输入使用BT.2111彩条，电平映射关系符合白皮书附件要求，彩条内BT.709彩条矢量入格
- 上转换输入使用RP-219彩条，电平映射关系符合白皮书附件要求
- 输入主观评价测试序列或熟悉的图像序列检查转换图像质量

谢谢！