

高光度放電燈(HID 램프)

(Trend of HID Lamps development)

1. 머릿말

형광램프, 저압나트륨 램프를 高出力化하기 위해서 자체적으로는 限界가 있으므로 램프에 封入하는 가스압(蒸氣壓)을 높여서 에너지 密度를 높이지 않으면 안된다. 형광램프 및 저압나트륨 램프는 약 10^{-3} mmHg (80 Pa) 정도의 金屬蒸氣와 수 mmHg 의 희유가스가 봉입된 低壓蒸氣放電램프인 반면에 高出力 즉 高光度放電램프는 1~ 수 10 氣壓에서 작동시키는 高蒸氣壓放電램프로서 高壓水銀램프 메탈할라이드램프 高壓나트륨램프등이 있다.

이들 램프를 일괄하여 HID 램프(High Intensity Discharge Lamps)라 불리고 있다. 이들의 共通된 특징은

- ① 비교적 소형으로 큰 光束을 얻을 수 있다.
- ② 램프效率[光束/入力]이 높다.
- ③ 수명이 길다.
- ④ 發光官의 管壁負荷[入力/表面積]가 크다.

를 들 수 있다.

水銀램프는 1906 年の Kuch 와 Retshinski 의 연구)에서 부터 시작되어 HID 램프주에서 先進의인 地位를 차지하여 왔으나 1950 년대에 이르러서는 거의 오늘날의 기술수준에 이르게 되고 耐熱性螢光體를 外球內面に 도포함으로써 높은 效率(약 60 lm/w) 을 얻을수 있었으며 또한 텅스텐幹棒위에 이층으로 코일을 감아서 電子放射物質을 도포하여

李 性 午
(檀國大 講師)

긴수명(12000시간이상)을 얻게 되었다. 램프의 이론에 있어서도 램프開發과 병행하여 발전하게 되었다. 특히 局所熱平衡(Local Thermal Equilibrium 약하여 LTE라 불린다)의 가정에서 出發하여 여러 가지 解析이 Elenfaas에 의해서 많이 이루어 졌으며 30년이상이 지난 오늘 날에는 램프開發에 관한 技術은 飽和狀態에 이르렀다고 보아도 과언이 아니며 사소한 부분적인 발전을 기대될 뿐이다. 또한 理論的인 면에서도 완결단계에 이르렀다고 보아도 좋을 것이다.

메탈할라이드램프는 고압수은램프發光管內에 演色性和 效率改善을 위하여 나트륨, 탈륨, 인듐, 주석 또는 각종 稀土類金屬의 할로겐化合物을 封入한 램프로서 1961년에 G·E社의 Reiling이 研究하여 開發한 후 램프製造者들이 中心이 되어 본격적으로 研究開發되어 왔다. 이 램프는 수은램프에 비해서 演色性和 效率이 획기적으로 향상시켰지만 수명, 시동 등에 있어서 몇가지 缺點이 있어 20여년이 지난 오늘날도 未解決된 部分이 남아 있다. 앞으로 材料和 프로세스측면과 屋內照明용 1) 客量, 小型램프의 研究가 활발하게 이루어지고 있다.

高壓나트륨램프는 메탈할라이드램프와 같은 시기인 1961년 美國의 G·E社에서 發明되었다.⁴⁾

이 램프는 半透明의 多結晶알루미나세라믹관을 사용하여 일반조명용 백색광원중에 가장 效率이 좋 115 lm/w (400W 램프의 경우)를 발표함으로써 각광을 받게 되었다. 이 半透明의 多結晶알루미나세라믹관은 高壓, 高溫의 알카리 金屬蒸氣에 대해서 安定되고 램프를 만드는 데 있어서의 필수적인 발명이라 볼 수 있다.⁵⁾ 그 管端의 封止加工에는 특수한 技術을 필요로 하였으나 오늘날에는 이미 이 분야의 技術은 정착되었으며 水銀램프의 수준에 이를만큼 수명이 길고 신뢰성이 높은 램프가 이루어 졌다. 다만 아직도 色溫度가 낮고 (~2100k) 平均演色評價類가 Ra = ~30로 낮다는 몇가지의 어려운 문제가 남아 있어 이에 대한 연구가 진행되고 있다. 본고에서는 우선 理論的인 部分과 製品側面으로 나누어 설명코자 한다.

2. HID램프의 理論動向

高壓水銀램프에서는 Elenbaas는 蓄積된 많은

실험데이터를 기초로하여 高壓水銀아아크에 대한 物理現象을 理論的으로 整理解析하였으며⁶⁾ 근래에 와서 이 영역에 있어서도 放射에 대한 전달식과 에너지 收支에 대한 方程式을 조합하여 아아크의 特性을 컴퓨터로 시뮬레이션하여 追究하기에 이르렀다.

Lowke 등은 時間에 따른 아래 回路方程式 (1), 오옴의 法則의 식 (2) 및 에너지評衡式을 풀었다.⁷⁾

첫째 回路方程式은 安定器와 램프의 아아크電壓의 합이 정현과공급전압을 인용하였다. 여기서 L와 R는 램프와 직렬로 연결되어 있는 安定器의 인덕턴스와 저항이다.

$$V_0 \cos wt = L \frac{dI}{dt} + IR + EH \quad \dots(1)$$

V_0 : 供給電壓 w : $2\pi n$ n : 60(주파수)

I : 電流 n : 아아크의 길이

E : 아아크의 電界強度

두번째

$$I = E \times \int 2\pi r \delta dr \quad \dots(2)$$

r : 아아크放電○의 管徑

δ : 導電率

세번째 이것은 交流點燈아아크에 적용시켜 에너지 平均式을 사용하였다.

$$\rho_p \frac{\partial T}{\partial t} - \delta E^2 - U + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r\pi \frac{dT}{dr} \right) \quad \dots(3)$$

ρ : 아아크의 密度 C_p : 定壓比熱

u : 放射係數, κ : 熱傳導度

T : 아아크의 溫度

이들 즉 (1) (2) 및 (3)의 方程式은 未知의 函數 $E(t)$ $I(t)$ 및 $T(r,t)$ 을 구하는 식으로서 ρ , C_p , δ , κ , n 등의 物理量을 溫度의 함수로 만들어 풀수가 있다.

이들의 量은 熱力學, 統計力學 등의 計算 또는 文獻 등을 參考로 하며 구하고 있지만 정확하고 광범위한 데이터를 입수하여 계산하여야 한다.

Groot는 自己級收스펙트럴라인의 光學的으로 두꺼운 라인의 放射에 관한 Bartel 法과 Kruithof 法の 타당성과 그 조건에 대해서 檢討하고 있다. 그 외에 放射損에 대한 近似法에 대해서 報告하고 있다.

Jen 등은 高壓나트륨램프의 溫度分布를 식 (4)에

서 假定하여 D線의 放射스펙트럼을 求하였다.

$$T(r) = T_c - (T_c - T_w) \cdot (r/R)^N \quad \dots (4)$$

여기서 r : 徑方向의 좌표, R : 發光管半徑

T_c : 中心溫度, T_w : 管壁溫度이다.

또한 共振이 擴大되어 옆에 생기는 두개의 光頭 放射가 實效溫度 T_e의 함수로서의 黑體放射의 比를 나타내는 식(5)에서 T_e를 구하고 있다.

$$\frac{I_{max2}}{I_{max1}} = \frac{B\lambda_{max1}(T_e)}{B\lambda_{max2}(T_e)} \quad \dots (5)$$

여기서 I_{max1}, I_{max2}는 두개의 옆에 생기는 피이크值, Bλ_{max1}(T_e), Bλ_{max2}(T_e)는 옆에 생기는 피이크值에 對應하는 黑體放射이다. 얻어진 T_e와 T_c와의 사이에는 直線關係를 잘 나타내고 있으므로 위의 두 피이크의 強度로부터 軸溫度 T_c를 추정하는 방법의 타당성을 나타내고 있다.

Groot 등은 高壓나트륨아아크의 溫度를

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial A} = \delta E^2 - \nabla F r - \nabla F c \quad \dots (6)$$

과 오옴法則을 사용하여 구하고 여기서 얻어진 溫度分布에서 부터 放射의 徑達式을 이용하여 발공 스펙트럼을 계산하였다.¹⁰⁾ 級收를 Lorentz profile을 이용하여 650~700 nm로 實測值와는 맞지 않았으나 그이외에는 잘 일치하였다.

J. F. Waymouth는 2段階溫度分布, 實効半徑 등의 개념을 도입하여 고압나트륨램프의 아아크모형을 더 簡素化시켜 D라인의 放射등을 計算하고 10%이내의 精度로 實驗值와 일치함을 보고하고 있다.¹¹⁾

이상에서 설명한 바와 같이 高壓水銀아아크 또는 高壓나트륨아아크에 대해서는 理論모델로부터 計算值와 實驗值와 일치하여 理論이 거의 완성되었다.

또 한편 메탈할라이드아아크에 대해서는 플라즈마성분의 계산에 化學平衡式, 擴散方程式을 적용하고 또한 플라즈마성분의 축 및 徑方向의 偏在現象 (Segregation phenomena)와 對流現象을 고려하지 않으면 안되는 課題가 남아 있다.

R. O. Shaffner는 化學平衡式에서 구한 플라즈마성분의 擴散을 무시하였기 때문에 實驗值와 일치하지 않았다.

D. M. Sperous 등은 주석할로젠化合物을 포함한 메탈할라이드램프의 管内反應을 氣體運動論과 化

學平衡式만에 의해서 플라즈마成分을 산출하여 解析하였다.

E. Fisher는 수종의 메탈할라이드아아크에 대해서 溫度分布 및 플라즈마成分의 物質收支(Material balance)로부터 出發하여 행하고 있다.¹²⁾ 定常아아크에서는 서로 반응하는 성분 of 각기 계열에 관해서 식(6)과 같은 化學平衡이 성립한다

$$\Pi P_i \alpha_j = K_j \rho(T) \quad \dots (6)$$

여기서 P_i : i成分의 分壓, α_j : 反應 j의 化學量論係數(stoichiometric coefficient), K_jρ : 平衡常數이다. 擴散束은 플라즈마溫度에서의 平衡定數의 變化에 의해서만 결정되고 多成分擴散理論으로부터 식(7)을 얻게 된다.

$$\text{grad} \frac{n_i}{n} = \frac{1}{n^2} \sum_j \frac{1}{D_{ij}} (n_j \mu_j - n_j D_i) \quad \dots (7)$$

여기서 n_i : i成分의 粒子密度, n : 全粒子數,

D_{ij} : i成分과 j成分粒子사이의 2成分擴散係數,

μ_j : i成分과 擴散束이다. 여기서 D_{ij}는 다음 식(8)에서 할 수 있다,

$$D_{ij} = \frac{3}{16n} \frac{1}{\mu_j} \frac{kT}{\Omega_j^{(1,1)}} \quad \dots (8)$$

여기서 μ_j : 減少量, Ω_j^(1,1) : 衝點數 또한 에너지收支로서 擴散束을 가미한 식(9)를 사용하고 있다.

$$\delta E^2 - \text{div}(-\lambda \text{grad} T + \sum_i u_i \mu_i) - u = 0 \quad \dots (9)$$

λ : 熱全導度, u_i : i成分粒子에 의해서 傳達되는 反應에너지

u : 全放射에너지

다만 放射 項은 무시하고 境界條件으로서 아아크軸위의 溫度傾斜, 아아크軸溫度, 壁溫度를 주어 더욱이 定常아아크狀態의 化學量論의取扱과 全體壓力이 아아크全體積에 걸쳐서 일정하다고 가정하여 數值解析法에 의해서 溫度分析 플라즈마組成등을 구했다. 이는 Hg를 포함하지 않는 아아크에 대해서 계산치와 실험치가 잘 일치하고, Hg를 함유하지 않는 아아크에 대해서 放射에 대한 項이 無視되었기 때문에 中心溫度가 실험치보다 높은 결과를 야기시켰다.

R. J. Zollweg¹³⁾ 등은 메탈할라이드아아크에서 현저하게 나타나는 現象으로 아아크의 溫度分布에도 영향을 미치는 첨가물의 偏在現象 (Additive

Segregation)에 관해서 乘値點燈시의 ScI₃, NaI을 함유한 아아크에서 軸方向만이 아니라 徑方向에서도 軸위의 電離 兩極性擴散場 및 아아크周邊部에서의 分子의 解離때문에 徑方向的 偏在現象(radial demixing)을 가져와서 이 效果를 가미한 化學平衡式을 計算하여 實驗과 일치하다는 것을 報告하였다.

W. M Keeffe 등은 메탈할라이드 아아크의 電氣 傳導度를 위한 半經驗的 모델과¹⁵⁾ G Eardly 등의 간소화된 모델등은 램프設計時에 많은 도움을 주는 指針이라 말할 수 있다. 또한 色에 대한 特性이 最適化를 위해서 컴퓨터시뮬레이션 및 設計變數의 多學量解析에 이용등도 發表되고 있다. 그러나 메탈할라이드아아크의 精確한 모델은 多成分擴散方程式을 포함한 物質收支와 放射의 傳播를 고려한 에너지收支를 對流 및 添加物의 偏在現象과의 關係를 연결시킴으로서 可能하다고 말할 수 있다.

3. HID램프의 개발동향

3. 1. 메탈할라이드램프

(1) 高效率·高演色性化, 메탈할라이드램프의 高效率 및 高演色化를 위해서는 發光管形狀의 設計

외에 發光物質인 封入할로겐化合物을 선택하는 것이 최대의 課題이다. 따라서 封入할로겐化合物의 탐색은 개발초기부터 계속되어 왔으나 최근에 이르러서는 그 封入물의 조합이 精確되어 가고 있다. 여기서 특히 주목을 끌 것은 이른바 複合化合物(Complex compound)에 의한 封入金속할로겐화합물의 蒸氣壓을 增大시킴으로서 그 增大效果는 표1에 표시한 많은 封入物을 組合에도 作用하고 效率 및 演色性向上에도 기여하고 있다. 複合化合物로서는 (17의) NaI·ScI₃, NaI·DyI₃, NaI·SnI, NaI·SnBr₂, NaI·AlCl₃, NaI·SnCl₂, NaI·PbI₂, CsI·NdI₃, CsI·CeI₃, LiI·ScI₃ 등이 보고 되었다. 다만 高效率化에 대해서는 표1의 조합중에서 Na-Tl-In系, Sc-Na-(Th)系の 할로겐化合物이 채택되었다. 근래에는 특히 후자의 Sc-Na-(Th)系에서 複合化合物인 NaI·ScI₃의 組成比를 最適化함으로써 效率向上을 시도하였다. 예를 들면 400W 램프에서 100lm/w, 또한 1Kw 램프에서 약 130lm/w 수준의 것을 얻을 수 있다.¹⁶⁾

高演色性化에 관해서는 처음에는 Sn의 할로겐化合物을 사용하여 Ra 92의 고연색성램프(효율은 400w에서 50lm)를 도입하였다. 근래에는 특히 稀土類金屬의 할로겐化合物이 밀집한 원자·이온스펙트럼에 가해 分子스펙트럼을 방사하여 고연색

표 1. 대표적인 메탈할라이드램프의 봉입할로겐화물의 조합

No	봉입할로겐화물의 조합	400W 램프의 특성례			발광 스펙트럼의 종류
		효 율 (lm/W)	평균연색성 가수 Ra	색 온 도 (K)	
1	NaI + TlI + InI	80	65~70	4,000~5,000	Na, Tl, In의 단순한 휘선 스펙트럼
2	ScI ₃ + NaI (+ ThI ₄)	100	65~70	3,500~4,500	Na의 휘선 스펙트럼과 Sc의 밀집한 다선 스펙트럼
3	DyI ₃ + TlI (+ NaI)	75	85~90	6,000	Tl, (Na)의 휘선 스펙트럼, Dy의 다선 스펙트럼 및 Dy·I의 분자 스펙트럼
4	SnI ₂ (+ SnBr ₂ , SnCl ₂)	50	92	5,000	SnI의 분자 스펙트럼
5	DyI ₂ + TmI ₃ + HoI ₃ + NaI + TlI	80	85	4,500~5,000	Na, Tl의 휘선 스펙트럼과 Dy, Tm, Ho의 다선 및 분자 스펙트럼
6	TmI ₃ + NaI + TlI	80	80	3,800~4,500	Na, Tl의 휘선 스펙트럼과 Tm의 다선 및 분자 스펙트럼
7	(Na + Tl + In) + Sn + (I ₂ + Br ₂)	70	80	3,000~3,500	Na, Tl, In의 휘선 스펙트럼과 SnI의 분자 스펙트럼

특성을 나타내는 것이 명백하게 되었다. 또한 표 1에 나타낸 바와 같이 Tm, Dy, Ho 등의 희토류금속과 강한 輝線스펙트럼을 방사하는 Na, Tl 등의 금속할로겐化合物을 組合한 램프가 개발되어 실용화되었다.¹⁹⁾이 램프는 색온도 4,000~5,000K로서 高演色性 Ra 85 高効率 80 lm/w 를 실현시키는 것이 특징이다. 이 이외에 분자스펙트럼放射인 Sn과 輝線스펙트럼放射의 Na, Tl, 및 In 의 할로겐化合物을 조합시킴으로서 따뜻한 느낌을 주는 低色溫度 3,000~3,500K의 光色과 Ra80에서 效率 70lm/w의 램프가 실용화되었다.

(2) 低電力 컴팩트화 메탈할라이드램프의 저전력 컴팩트화에 따르는 問題点으로서는 1) 效率의 低下 2) 電極輝點의 不安定性和 光劣劣化 3) 不純가스의 發光管容積에 대한 相對量의 증가에 따른 始動特性 및 動程特性의 惡化등을 들 수 있다. 問題点 1)에 대해서는 기본적으로 發光管의 高負荷設計에 의해서 封入物蒸氣壓을 높임과 동시에 電極封着端部の 面積縮小 또는 一端封着構造의 채용으로 熱損失을 감소시킴으로서 이에 대응하고 있다. 2)에 대해서는 電極設計의 最適化을 시도하고 있다. 3)에서는 특히 發光管프로세스에 있어서 不純物(H₂O)의 혼입을 방지하기 위해서 石英發光管의 레이저가공기술, 열처리기술 알곤블로우(Argonblow) 중에서 블로우형成形外管프로세스등이 開發되었다. 또한 石英素材에 대해서도 眞空溶融法으로 만들어진 H₂O의 含有量이 2ppm 이하의 石英이 쓰여지고 있다.

3. 2. 高壓나트륨램프

1) 일반형 램프의 高効率化

高壓나트륨램프의 일반형 (色溫度 2050 K Ra25)은 效率이 최대가 되도록 設計되어 있다. 開發始初의 效率는 400W 형이 105 lm/w이었으나 그 이후 發光管設計의 最適化²¹⁾²²⁾과 알루미늄 세라믹관의 改良²³⁾으로 125 lm/w의 값을 얻었으며 더욱이 최근에는 始動補助用 稀有가스인 Xe가스의 봉입압을 당초의 30Torr에서부터 200~350 Torr까지 높임으로서 139 lm/w의 수준에 까지 이르렀다. 램프 效率를 이 이상으로 높인다는 것은 현재의 PCA管을 사용한 램프設計에서는 한계에 이르렀다. 따라서 單結晶알루미나²⁴⁾또는 잇도리아등의 새로운 發

光管材料또는 設計面에서 새로운 아이디어가 모색되고 있다.

2) 高演色化와 低電力컴팩트化

高壓나트륨램프의 演色性은 나트륨 蒸氣壓과 發光管内徑의 두가지 放電패러미터를 크게함에 따라 發光스펙트럼이 可視部全域에 퍼져서 개선되었다. 그러나 放射의 視感效率이 낮으므로 램프效率는 필연적으로 低下된다. 근래에는 이 현상을 응용하여 演色性改善形(色溫度 2150K Ra 60)과 演色性改善形(色溫度 2500 K/2800K Ra 85/78)의 두가지 형태가 출현되었다. 이들은 高壓나트륨램프의 응용을 옥내조명분야에까지 확대되고 특히 屋內照明分野의 演色本位形은 백열전구와 비슷하여 온화한 光色과 바람직한 演色效果를 가졌기 때문에 店舖照明 등에 진출하고 있다. 최근에는 演色本位形에서는 종래의 150W, 250W, 400W에 이어서 50w의 低電力램프가 제품화되었다. 또한 徑이 적은 直管形外管을 사용한 컴팩트形이 유럽과 日本등에서 계속적으로 발표되었다.

3) 기타의 開發活動

근래에 주목되는 開發成果로서 한정된 소량의 나트륨아말감을 봉입한 不飽和蒸氣壓形高壓나트륨램프가 제품화되었다. 이 램프의 특징은 水銀램프와 같은 一定한 램프電壓詩性과 耐振性이 우수하다는 것이다.

최근에는 나트륨아말감에 세슘(Cs)을 첨가하여 램프의 消弧特性을 개선하고 400W 수은램프용安定器로 점등할 수 있는 300W의 전력절감형램프(효율 85lm/w)도 출현하였다.

이 이외에 기술개발로서 종래의 Nb管대신에 Nb棒을 사용한 發光管設計와 電極構造의 새로운 設計 또는 에미터材料등이 도입되었다.²⁵⁾

3. 3. HID램프에의 일렉트로닉스응용

HID램프에서는 형광램프에 비해서 高周波점등에 의한 램프效率上昇은 적으며 따라서 電子點燈方式의 利點은 램프유닛트의 (1)形輕量化, 프리커링防止, 消弧特性 등의 改善에 있다.

HID램프의 高周波點燈에서 最大의 問題点은 음향공명현상에 의한 아아크의 不安定性에 있다. 高壓나트륨램프에서는 아아크가 不安定하게 되는 주

파수범위가 좁고 한정되어 있으므로 이것을 피하기 위해서 高周波點燈을 적용시키게 된다.²⁶⁾²⁷⁾

메탈할라이드램프에서는 不安定性을 가진 주파수범위가 넓어져 고주파점등을 적용시키는데 그만큼 어렵게 되었다. 지금까지는 음향공명의 防止方法으로서 (1) D·C 點燈, (2) 구형과점등 (3) 第3高周波重疊 또는 周波數變造方式, (4) 100 KHz 이상의 高周波點燈등이 제한되고 있다.²⁷⁾

종래 메탈할라이드램프용으로서 周波數 100 KHz 이상에서 第3高周波重疊方式, 100 KHz 이상에서 power-MOS-FET를 사용한 他勵式수위플인버터回路, 發光管에 직렬로 접속한 필라멘트에 의한 D·C 點燈方式(램크와 點燈回路의 일체화) 등의 電子安定器가 보고 되고 있다. 아직까지 實用된 예는 적지만 최근에는 구형과점등을 基底로 한 70W 안정기가 제품화되고 있다.

4. 결 언

石油危機는 결코 否定的인 면만은 아니고 긍정적인 면으로는 에너지절약형인 HID램프는 15년 동안 눈부신 研究活動으로 큰 成果를 거두었다. 앞으로 10년간은 이들의 제품을 보급시킴과 동시에 다음 世代의 새로운 제품의 씨앗을 찾아 내는 시기라 말할 수 있다. 특히 電子式安定器에 많은 문제점이 아직 남아 있으므로 電子計算機의 도움으로 빨리 實用化시키기를 바란다.

參 考 文 獻

- 1) Kuch, R. et al : Annalen phys. Leipzig Vol.20 pp 563(1905)
- 2) Reiling, G H : USP 3,234,421 (1961)
- 3) Reiling, G H : J. Opt. Soc. Amm, Vol.54 p 534 (1964)
- 4) Schmidt, K. : Proc. 6th Int. conference ion phen in gases. 3 pp323 (1963)
- 5) Coble, R. C : USP 3,026,210 (1962)
- 6) Elenbaas W. : The High pressure mercury

- uapour discharge, North-Holland, pub. co (1951)
- 7) Lowke, J. J : J. Appl. Phys. 46-2 (1975) p. 650
- 8) de Groot, J. J et al. : J Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 13(1973) p615
- 9) Ten-Sen-Jen et al. : J. Quant Spectrosc. Radiant Transfer 9 (1969) p. 487
- 10) de Groot, J. J et al. : Philips Tech Rev. 35(1975) p. 334
- 11) Waymouth, J. F. : Journ. Ill. Eng. so. (April 1975) p. 131
- 12) Fisher E. : J. Appl. Physics 45-8(1974) p.3365
- 13) Zollweg R. J : J. Appl. phys 49(1978) p. 1077
- 14) Fisher, E. : J Appl. phys. 47-7(1976) p. 2954
- 15) Keefe, W. M. et al. : J. Illum. Engin. So.(July 1978) p. 249.
- 16) Eardly, G et al. : J. Phys. D. Appl. physc. 12 (1979) p. 1101.
- 17) Lorenz. R : LLight, Research & Technol. 8 (1976) p. 136.
- 18) 石神敏彦 外 : 東芝レゼヴ - 36(1981) p.483
- 19) Doburussskin : Lichttechnik 23(1971) p.135
- 20) D. C. Fromm, et al : Light, Res. l Technol. 11 (1979) p. 1.
- 21) Waymouth, J. F. et al : J. Illum Eng. So 10 (1981) p. 237.
- 22) Denbigh, P. L. : Light. Res. & Technol. 6 (1974) p. 62. & 10 (1978) p. 28.
- 23) Laska, H. M at al : USP 4150 317
- 24) Loytty, E. : Light. Design & Appl. 6(1976) p. 30.
- 25) R. S Bhalla : J. Illum, Eng. Soc. 8 (1979) p. 174.
- 26) Witting, H. L. : J. Appl. Physics 49(1983) p. 2680.
- 27) 越村安信 外 : 照明學會誌 67(1983) p. 55.