

레이저 發振用 세논기체 閃光管의 放電系統解析

(Analysis of Xenon Flash Lamp Discharge System for Laser Excitation)

金 暎 權 *

(Kim, Young Kwon)

李 文 基**

(Lee, Moon Key)

要 約

세논 閃光管의 방전회로에 관한 특성을 상세히 논했다.

閃光管은 전류에 비선형적이므로 방전회로에 관한 $I' + \alpha I^{\frac{1}{2}} + \int_0^{\tau} Id\tau = 1$ 의 비선형 미분방정식을 유도하여 解를 相似形電子 계산기로 구했다.

또한 더욱이 임의의 섬광관에 대한 입력에너지 펄스지속시간 및 모양, 인덕턴스, 콘덴서 그리고 동작전압에 대해 완전히 고찰했다.

아울러 본 해석결과를 이용하면 섬광관 방전계통회로를 정확히 설계할수 있음을 제시했다.

ABSTRACT

The characteristics of single mesh discharge circuit for Xenon flashlamp has been analysed in detail.

Since flashlamp voltage characteristics is linear in time, though nonlinear in current, the nonlinear differential equation $I' + \alpha I^{\frac{1}{2}} + \int_0^{\tau} Id\tau = 1$, for this system has been solved by the analog computer.

Also for given lamp type, energy input, pulse duration, and pulse shape factor, the inductance, capacitance and operating voltage were discussed.

I. 序 論

선형 혹은 나선형 세논기체 閃光管은 콘덴서에 축적된 에너지를 방전시켜 큰 전류밀도를 쉽게 얻을수 있기때문에 고체 레이저 光펌핑(Pumping)源으로 많이 이용된다.

이런 閃光管은 단일 혹은 복합 LC회로망으로 동작시키지만 閃光管 자체에 대한 공학적 자료가 충분치 못하므로 대부분의 경우 막연히 구동

회로를 설계하여 사용하곤 한다.

즉 단일 LC회로인 경우 편리한 전압에서의 에너지 축적만 고려하여 콘덴서 값을 결정하고 인덕턴스는 閃光管의 파괴를 방지키 위해 적당히 선택하여 사용했다.

이런방법은 세논기체 閃光管이 선형저항이라 간주하면 무난하지만 실제로 閃光管의 특성은 전류의 비선형적 이기때문에 (1), 光出力, 전류펄스 에너지 등이 크게 문제되므로 구동회로 설계가 중요한 역할을 하게된다.

따라서 본논문에서는 세논기체 閃光管이 전류의 비선형적 특성을 갖고 있다는 사실에 근거하여 단일회로망으로 구성된 閃光管 방전 계통에

* 慶熙大 電波工學科

Dept, of Wave Engr, Kyung Hee Univ.

** 延世理工大 電氣工學科

Dept, of Elect. Engr, Yonsei Univ.

대해 해석한다. 이 해석 결과를 이용하면 아울러 閃光管子동회로 설계 최적조건을 얻을수 있다.

II. 閃光管의 非線形性

우선 방전계통의 전체적 해석에 앞서 閃光管의 물리적 크기에 대한 특성을 고찰해보자
 섬광관의 전압 V_T 는 전류 i 의 함수로 다음과 같다.(2).

$$V_T = V_e + (i r(J) \frac{\ell}{A}) \quad (1)$$

여기서 ℓ 은 아크(Arc) 길이 이고 A 는 섬광관의 단면적을 나타내며 단위는 각각 cm, cm²이다.

또한 V_e 는 전극 자체에서의 전압강하이며 대략 10~20volt 정도이고 아크길이가 짧은 방전때와 대단히 미소한 전류인 경우를 제외하고는 섬광관 충전압 강하에 별 영향을 미치지 않는다.(3).

$r(J)$ 는 세논플라즈마(Xenon plasma) 상태의 고유저항이고 전류밀도 J 만의 함수로 $r(J) = 1.13 J^{-\frac{1}{2}}$ ohm-cm이다.

따라서 임의 전류에서의 섬광관의 저항은 아래와 같이 표시 할수 있다.

$$R = r(J) \frac{\ell}{A} = 1.13 \ell (iA)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

콘덴서를 방전시키므로 섬광관에서 간단히 3000~10000 Amp/cm²의 전류밀도를 얻을수 있고 이경우 고유저항은

$r(J) = 1.13 J^{-\frac{1}{2}}$ 식에의해 0.011~0.02 ohm-cm 가 됨을 알수있다.

식(1)에서 섬광관의 전류가 큰경우 V_e 를 무시하면 섬광관 전압특성은 아래식과 같이 된다.

$$V_T = i r(J) \frac{\ell}{A} \quad (3)$$

식(2)와 전류 $i = JA$ 를 식(3)에 대입하여 정리하면

$$V_T = K_0 i^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

이된다.

단 여기서 K_0 는 $1.13 \ell A^{-\frac{1}{2}}$ 이고 단위는 ohm-AMP^{1/2}이다.

그럼 K_0 가 섬광관의 방전 체적 단위에 의해 어떻게 변하는지 고찰해 보자.

지금 아크길이 ℓ 은 동일하고 반경이 각각 d ,

d' 인 두개의 섬광관이 방전시 전류밀도가 J 이라면 각각의 전압강하는 $V_T = K_0 (\frac{\pi}{4} d^2 J)^{\frac{1}{2}}$,

$V'_T = K'_0 (\frac{\pi}{4} d'^2 J)^{\frac{1}{2}}$ 이므로 두경우의 전압강하가 같기 위해서는

$$K_0 = K'_0 \frac{d'}{d} \text{ 이면 된다.}$$

그런데 $K'_0 = 11.3 \ell (\frac{\pi^2}{4} d')^{-\frac{1}{2}}$ 이므로

$$K_0 = K'_0 \frac{d'}{d} = k \frac{\ell}{d} \quad (5)$$

가된다.

그러므로 K_0 는 d^2 이 아니고 d 에 역비례함을 주의 해야하고 상수 k 는 다만 기체의 종류, 기체 압력 등에 관련됨을 알수있다.

따라서 K_0 와 k 가 주어진 섬광관의 大電流 전기적 특성을 나타내는데 필요한 매개상수 임을 알수 있고 식(2), (3) 에의해 섬광관의 저항, 전압강하는 전류에 선형적으로 변화되지않고 비선형적임을 알수 있다.

III. 單一回路 放電 非線形 方程式

콘덴서가 초기전압 V_0 로 완전 충전된 그림 1과 같은 섬광관 방전계통을 고찰하자

섬광관의 특성이 비선형적 이므로 이방전계통

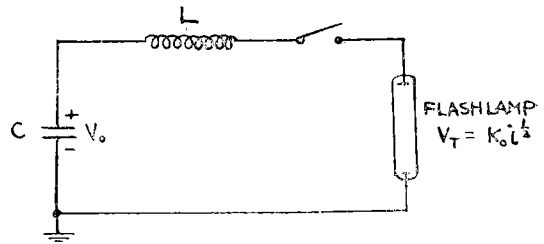


그림 1. 섬광관 방전 회로
 Fig. 1. Flashlamp Discharge Circuit.

은 비선형미분방정식으로 다음과 같이 된다.

$$L \frac{di}{dt} + K_0 i^{\frac{1}{2}} + \frac{I}{C} \int t d\tau = V_0 \quad (6)$$

구동회로 자체는 손실이 없고 섬광관 만의 손실을 고려했다.

다음과 같이 계수를 치환시키고 정규화한다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad i = I \frac{V_0}{Z_0}, \quad \tau = \frac{t}{T} \quad (7)$$

$$T = \sqrt{LC}$$

$$\alpha = \frac{K_0}{(V_0 Z_0)^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

그러면 식(6)은 아래와 같이 된다.

$$\frac{dI}{d\tau} + \alpha I^{\frac{1}{2}} + \int_0^{\tau} I d\tau = 1 \quad (9)$$

식(9)를 YONSEI ANALOG COMPUTER I 에 프로그램하여 α 의 여러값에 대해 전류곡선을 기록제로 기록했다.

그림 2~4가 $\alpha=0.2$ 에서 $\alpha=3.2$ 까지에 대한

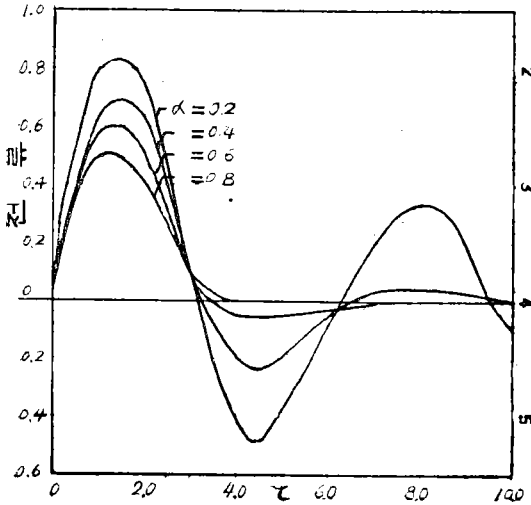


그림 2. 정규화한 전류 ($\alpha=0.2\sim0.8$)
Fig. 2. Normalized Current

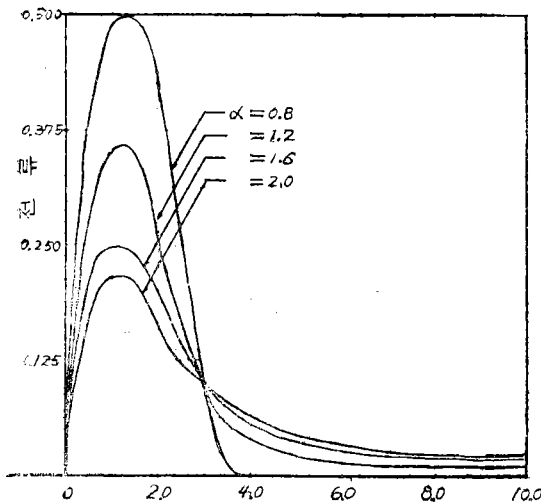


그림 3. 정규화한 전류 ($\alpha=0.8\sim2.0$)
Fig. 3. Normalized Current

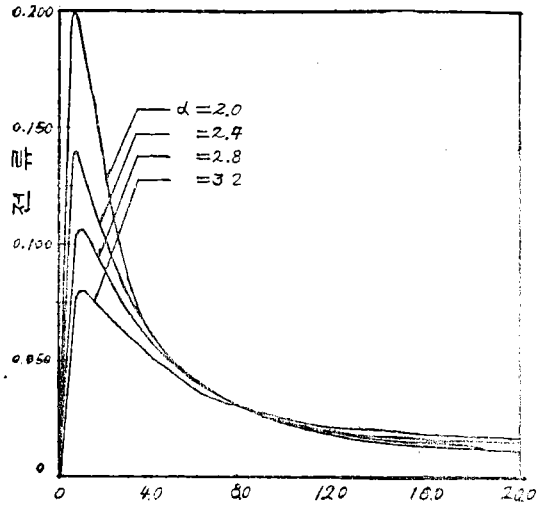


그림 4. 정규화한 전류 ($\alpha=2.0\sim3.2$)
Fig. 4. Normalized Current

정규화한 전류파형을 나타낸다.

LCR선형계통과 섬광관 방전의 비선형 계통의 차이를 명확히 알수 있다.

입력의 V_0, Z_0 에 대하여 전류의 침투치가 비선형 계통이 선형계통 일때 보다 급격히 감소하며 또한 전류파형의 零軸교차회수는 선형진동적인 경우 無限回인데 비해 비선형일 경우 有限回이다.

전류파형의 임계치는 $\alpha=0.7$ 일때이며 감쇠상수 α 는 콘덴서의 초기 충전 전압 V_0 에도 관계됨을 알수있다.

α 에 대한 전류파형의 형태를 알므로 적합한 방전회로를 설계할수 있다.

IV. 電力 및 에너지

콘덴서에 초기에 축전된 에너지는

$$E_0 = \frac{1}{2} CV_0^2 \quad (10)$$

이다.

식(10)을 이용하여 식(8)에서 V_0 을 제거하면

$$C^{\frac{3}{2}} = \frac{2E_0 d^4 T^2}{K_0^4} \quad (11)$$

콘덴서의 용량을 구하는 식을 얻는다. 섬광관의 입력전력은

$$P = vi = K_0 (i)^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

이때 정규화 시킨 전력은 다음과 같다.

$$PN = \frac{P}{V_0^2/Z_0} = \alpha I^{\frac{3}{2}} \quad (13)$$

곡선 그림 2~4에 의해 계산한 결과 $\alpha=0.2$ 에서 $\alpha=3.2$ 까지에 대한 PN의 곡선이 그림 5~7이다.

또한 섬광관에서 소비된 에너지는 $E = \int_0^t P dt$ 이므로 정규화한 에너지는

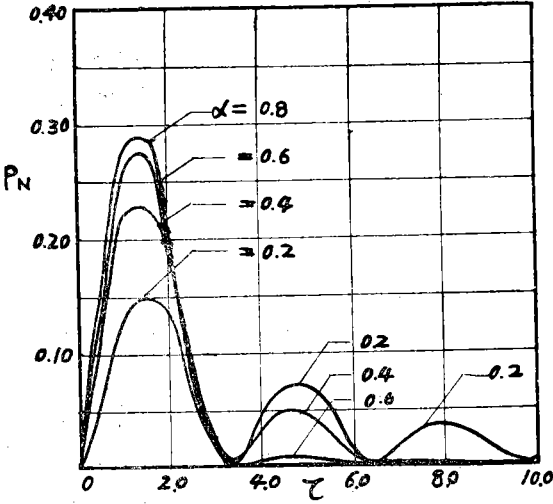


그림 5. 정규화한 전력 P_N ($\alpha=0.2\sim0.8$)
Fig. 5. Normalized Power

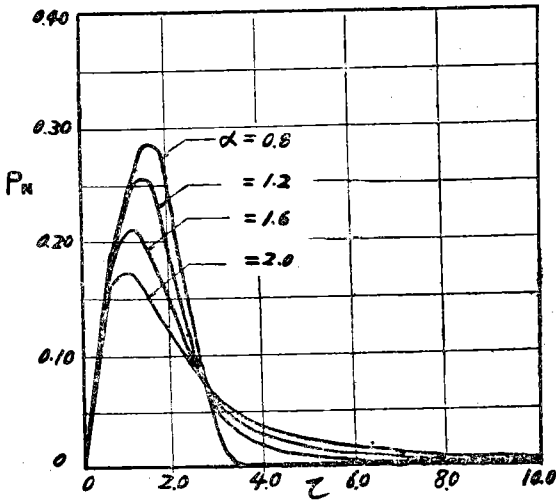


그림 6. 정규화한 전력 P_N ($\alpha=0.8\sim2.0$)
Fig. 6. Normalized Power

$$E_n = 2\alpha \int_0^{\tau} I^{\frac{3}{2}} d\tau \quad (14)$$

이때 $\alpha=0.2$ 에서 $\alpha=3.2$ 범위에 대한 E_N 의 곡선이 그림 8~10이다.

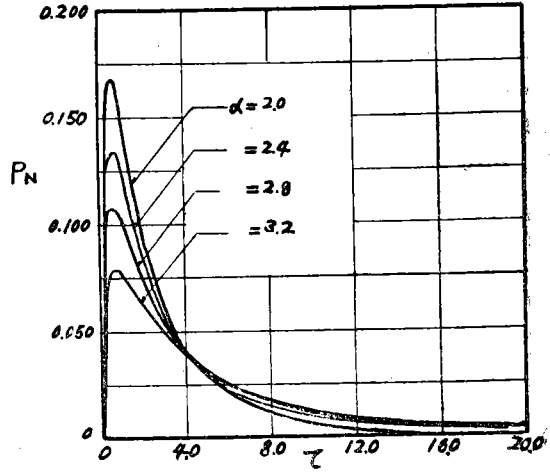


그림 7. 정규화한 전력 P_N ($\alpha=2.0\sim3.2$)
Fig. 7. Normalized Power

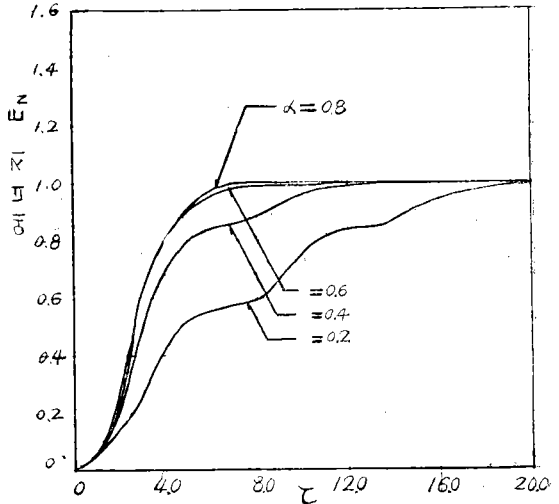


그림 8. 정규화한 에너지 ($\alpha=0.2\sim0.8$)
Fig. 8. Normalized Energy

입력에너지 E_0 , 펄스모양 α , 시간스케일 T , 그리고 K_0 의 필요한 일정값을 선택하면 식 (7), (8), (11)에 의하여 여기에 적합한 C. L. V_0 를 결정할수 있다.

따라서 필요한 방전회로를 구성할수 있음을 알

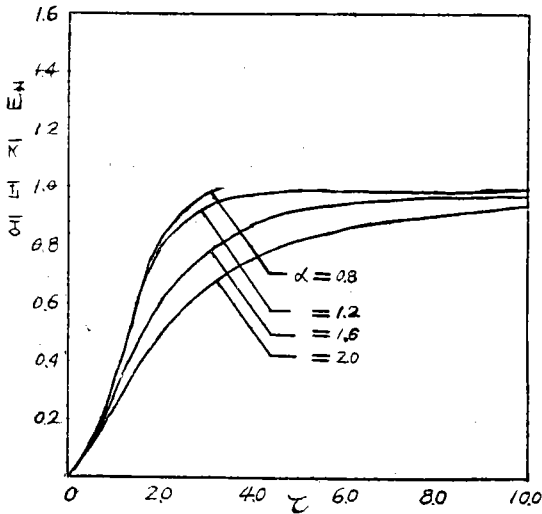


그림 9 정규화한 에너지 ($\alpha=0.8\sim 2.0$)
Fig. 9 Normalized Energy

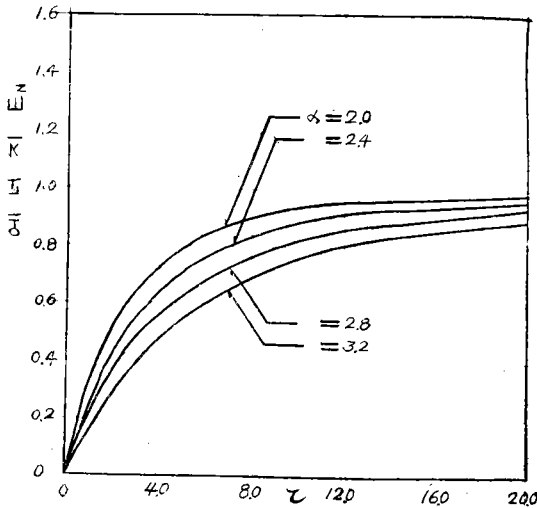


그림 10. 정규화한 에너지 ($\alpha=2.0\sim 3.2$)
Fig. 10. Normalized Energy

수있다.

지금껏 방전회로에 의한 손실은 고려하지 않았는데 일정 저항성분 T 에 의한 회로 손실이 있을 경우 식(9)는

$$\frac{dI_s}{d\tau} + \left[\alpha + I_s \frac{r}{Z_0} \right] I_s^{\frac{1}{2}} + \int_0^{\tau} I_s d\tau = 1 \quad (15)$$

와 같이 수정됨을 알수있다.

따라서 이선형저항 손실의 정규화한 에너지는

아래식으로 주어진다.

$$E_{RN} = \frac{E_r}{E_0} = \frac{2r}{Z_0} \int_0^{\infty} I_s d\tau \quad (15)$$

식(9)의 전류해결 I_s 값으로 사용하여 적분 $2 \int_0^{\infty} I_s^2 d\tau$ 값을 α 의 함수로 그린 결과 그림11을 얻었다.

섬광관을 제외한 방전회로 자체 손실은 그림 11에 의해 예측할수 있다.

$\left(\frac{r}{Z_0} \right) I_{max}^{\frac{1}{2}}$ 가 α 에 비해 극히 작을 경우 위의 예측 결과는 정확하게 된다.

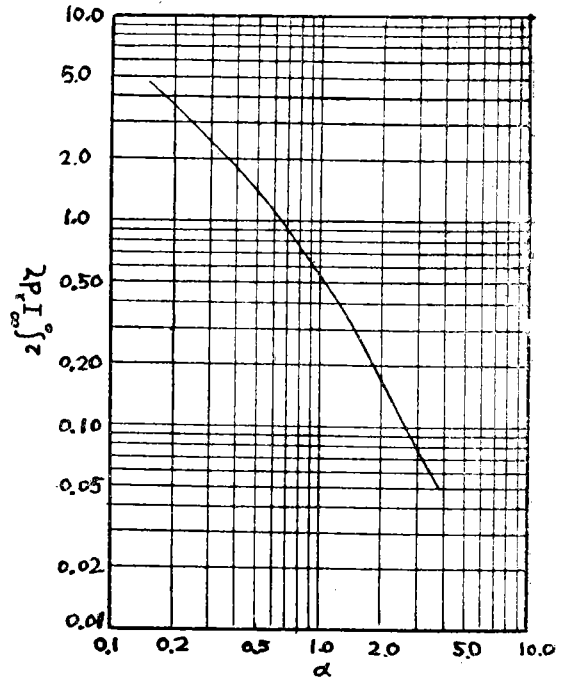


그림 11. α 의 함수로써 적분 $2 \int_0^{\infty} I_s^2 d\tau$ 의 값

Fig. 11. The Value of Integral $2 \int_0^{\infty} I_s^2 d\tau$ as Function of α

만약 α 에 비해 $\left(\frac{r}{Z_0} \right) I_{max}^{\frac{1}{2}}$ 이 극소량 일 경우 전류가 $I=0$ 에서 $I=I_{max}$ 로 변화되더라도 α 는 극히 약간 증가되지만 식(9)의 해를 식(12)의 해로 간주해도 무방하다.

실제로 숫자를 대입하여 비교해 보자 직경 1cm 길이 15cm의 세는 섬광관을 3000 Joules로 방전시켜 $600\mu s$ 의 임계치 펄스를 얻으려고 한다.

이 경우 $E_0=3000\text{Joules}$, $T=200\mu s$, $\alpha=0.75$

$K_0 \approx 25 \text{ ohm-Amp}^{\frac{1}{2}}$ 가 된다.

무손실 방전회로이면 식 (7) (11)에 의해
 $C=580 \mu F$, $L=69 \mu H$, $Z_0=0.345$ 가 된다.

그림 11과 식 (16)에 의해 0.04 ohm 회로손실이 총에너지의 약 10%를 소비함을 알 수 있다.

그림 2에서 $\alpha=0.75$ 일때 I_{max} 는 0.53 이므로
 $\left(\frac{r}{Z_0}\right) I_{max}^{\frac{1}{2}} \approx 9.99$ 가 된다.

따라서 전류가 첩두치 영역정도에서만 α 가 약간 변화를 받을 뿐이다.

그러므로 섬광관만을 손실요소로 간주하고 방전회로를 설계해도 펄스 모양엔 별 차이가 없다.

V. 結 論

세논 기체 섬광관 방전회로에 대한 해석을 기술했고 이 해석 결과 방전회로를 간단히 단일 LC 회로로 구성할 최적조건을 발견했다.

세논 섬광관의 특성은 시간에 대해서 선형적이지만 전류에 비선형적으로 변화되며 아르 프라

즈마 상태에서의 고유저항은 대략 $0.01 \sim 0.02 \text{ ohm-cm}$ 정도이다.

섬광관 방전특성을 표시하는 비선형 미분 방정식을 유도하여 해석한 결과로 임의의 세논 섬광관의 입력에너지, 동작전압, 펄스지속시간 및 모양, 콘덴서 와 인덕턴스의 값을 정확하게 결정할 수 있게 되었다.

謝 意

비선형 미분 방정식의 解를 구하기 위해 YON SEI ANALOG COMPUTER I을 프로그래밍 하여 주신 최경삼씨, 임광선 씨의 노고에 감사를 드립니다.

참고 문헌

- (1) V.I. Vasiliev, et al. ; J. Opt. Soc. Am, 51, P118, 1961
- (2) I.S. Marshak ; Sov. Phys.Usp, 5, P478-514, 1962
- (3) J.H. GONCZ ; J. Appl. Phys., 36, P742-743, 1965