

GaAs 기판상에 구성된 방향성 결합기를 이용한 진행파형 광변조기의 해석 Analysis of traveling-wave directional coupler optical modulator on GaAs

최 원준, 안 임기, 홍 성철*, 이 정일, 강 광남
한국과학기술연구원 광전자 연구실
* 한국과학기술원 전기 및 전자공학과

요 약

GaAs Schottky 접속 전송선을 전극으로 하는 진행파형 광변조기의 특성이 분석되었다. 초고주파의 전파특성은 quasi-TEM 모델에 의해 분석되었으며, 고유치 방법과 유효 굴절률법을 결합하여 광파의 전파특성을 분석하였다. 또한 이를 통해 Schottky 접속 전송선 및 광도파로의 기하학적 변수에 따라 진행파형 광변조기의 성능지수를 계산함으로써 최적 설계조건을 계산하였다.

I. 서 론

초고주파 영역에서의 광변조기술은 비어의 광통신이나 초고주파 시스템에 매우 중요한 기술이다. 이러한 광변조기술중 초고주파 영역에서의 광변조기술은 대량 통신을 위해 매우 필수적이며, 특히 외부 변조방식으로 진행파형 전극을 이용하는 경우가 활발히 연구되고 있다.^(1,2) 전기장효과에 기반을 둔 이러한 광변조기는 GaAs 위의 Schottky 접속 전송선을 전극으로 이용함으로써 실현 가능하며, 동일 기판상에 다른 전자소자와 쉽게 집적할 수 있는 장점이 있다.

Rod C. Alferness에 의하면 진행파형 광변조기의 특성을 극대화하기 위해서는 (1) 매질 내에서의 초고주파의 속도와 광속도의 정합 (2) 임피던스 정합의 두가지 조건이 동시에 충족되어야 한다.⁽³⁾ 이 두가지 조건중 (1)의 조건에 의해 변조대역폭은 보다 크게 제한된다. 하지만 GaAs를 기반으로 하는 경우, 초고주파와 광파의 속도차가 유전체에서와 같이 그리 크지 않으므로 반도체상의 전송선에서 기인하는 상대적으로 큰 초고주파 손실은 앞의 두 요인보다 더 크게 변조대역폭을 좌우하게 된다.^(2,4)

본 연구에서는 Schottky-1-n⁺ 구조를 갖는 GaAs 기판상의 전송선에 간단한 Quasi-TEM 모델을 적용하여 이러한 전극 구조를 갖는 진행파형 광변조기의 초고주파 전파특성을 분석하였다. 이 모델을 통하여 반도체에 의한 손실과 전극에 의한 손실을 모두 취급할 수 있었다.

광변조기의 변조특성은 광파의 전파특성에 의해서도 결정되므로 이의 해석이 또한 중요하다. 이의 해석을 위해 보통은 유효굴절률법을 사용하지만 이 방법은 다층구조 및 전극의 해석에 난점이 있다. 이러한 난점을 극복하기 위해 수치해석적 고유치방법과 유효굴절률법을 결합하여 광파의 전파특성을 분석하였다. 또한 도파로 사이의 광파의 결합은 결합모드이론에 의해 계산되었다.

본 연구에서는 기하학적 변수에 의존하는 초고주파 특성 및 방향성 결합기의 결합특성 분석을 통하여 진행파형 광변조기의 변조특성 및 성능지수를 계산, 비교하였다.

II. (100) GaAs 기판상의 전기장효과

GaAs는 광학적으로 등방성이며 43m zincblende 대칭구조를 갖는다.⁽⁵⁾ 만약 (100) 기판을 사용하려면 (1) <100> 방향으로 전기장을 인가하는 경우와 (2) <011> 방향으로 전기장을 인가하는 두가지의 경우에 대한 고려가 있어야 한다. (1)의 경우 빛이 <011>으로 진행하면 전기장에 의해 유기되는 새로운 굴절을 타원체의 주축은 TE-전극 방향과 만나게 된다. 따라서 이 두 방향은 단위전압당 최대의 굴절

률 변화를 얻을수 있는 방향이다. 하지만 새로운 x,y 축은 (100)면과 45° 만큼 기울어져 있기 때문에 (2)의 경우에는 TE 모드에 대해 어떠한 굴절률의 변화도 얻을 수 없다. 따라서 (100) GaAs 기판상에 전기장효과를 이용하여 intensity modulator를 구성하려고 할 경우 <100>방향과 평행한 전기장만이 사용 가능함을 알 수 있다.

III. Schottky 접속 전송선 모델

GaAs 기판상의 Schottky 접속 전송선은 진행파형 광변조기의 전극으로 흔히 이용된다. 이때 반도체와 Schottky 전극 사이에는 공핍층이 형성되며, dc 역전압에 의해 n⁺ 영역까지 완전히 공핍화된 Schottky 접속 전송선은 그 구조상 여러 연구자들이 의해 연구된 MIS 구조와 흡사하다.^(6,7,8) 따라서 이 구조를 MIS 구조로 생각하고 quasi-TEM 해석방법을 원용할 수 있다.

Quasi-TEM 해석에서는 반도체의 skin depth보다도 작은 n⁺층으로의 침투깊이를 갖는 quasi static field를 가정한다. 따라서 소자에서의 quasi static field의 범위를 L_{qs}라 할 때 이 모델이 성립하는 초고주파의 주파수 범위는 f < f₁ 이어야 한다. 이때 f₁는 skin depth가 L_{qs}일 때의 주파수로 다음과 같이 표시된다.

$$f_1 = \frac{1}{\pi \sigma_0 \mu_0 L_{qs}^2} \quad (2)$$

여기서 σ_0 는 n⁺층의 전도율이고, μ_0 는 진공중의 투자율이다. 또한 초고주파의 주파수 f는 유전체 감쇠 주파수 f₂보다 작아야 한다. 이때 f₂는 다음과 같이 주어진다.

$$f_2 = \frac{\sigma_0}{2\pi \epsilon_0 \epsilon} \quad (3)$$

이때 ϵ 는 n⁺층의 유전상수이다. 위와 같은 두가지 조건이 충족되는 초고주파의 주파수 영역에서는 자기장은 n⁺-반도체 기판과 자유롭게 투과하고 전기장은 공핍층에 갇히게 된다. 이러한 전기장과 자기장의 분리는 초고주파의 slow-wave 모드 전파를 야기하게 된다.⁽⁶⁾

위와 같은 조건을 조건을 충족시킬 때 그림 1과 같은 전극구조를 갖는 광변조기/switch의 단위길이당 저항, inductance, capacitance는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \frac{F}{C_0^2 \epsilon_0} \quad (4)$$

$$C_0 = \frac{W \epsilon_1 \epsilon_0}{h} \quad (5)$$

$$R_m = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_m t W} & , t \geq \delta_m \\ \frac{1}{\sigma_m \delta_m W} & , t \leq \delta_m \end{cases} \quad (6)$$

$$R_L = \frac{1}{\sigma_s \delta_s W} \quad (7)$$

$$R_c = \frac{F}{\sigma_s} \quad (8)$$

$$F = \begin{cases} \frac{\ln\left(\frac{2(1+\sqrt{S})}{1-\sqrt{S}}\right)}{\pi} & 0.707 \leq k \leq 1. \\ \frac{\pi}{\ln\left(\frac{2(1+\sqrt{S})}{1-\sqrt{S}}\right)} & 0 \leq k' \leq 0.707 \end{cases} \quad (9)$$

$$k = \frac{S}{S+2W}$$

$$k' = \sqrt{1-k^2}$$

위의 식들에서 σ 는 전도도, δ 는 skin depth, s 는 n^* 층, m 은 Schottky 금속, C_0 는 진공중의 광속도를 각각 나타낸다. 그림 2와 같은 등가회로에서 전송선 이론을 이용하면 attenuation, slow-wave factor, characteristic impedance를 구할 수 있다.

IV. 광도파로 및 방향성 결합기의 해석

굴절율이 y 의 함수로 $n(y)$ 로 주어지는 유전체를 밀집로 하는 평판 도파로의 $x-z$ 평면에서 z 방향으로 진행하는 TE 모드의 광파는 다음과 같은 파동 방정식을 만족한다.

$$\frac{d^2 E_x}{dy^2} + [k_0^2 n^2(y) - k_z^2] E_x = 0 \quad (10)$$

이 때 k_0 는 진공 중에서의 파수이고, k_z 는 (10)식의 고유치인 도파로에서의 파수로 다음과 같다.

$$k_z = k_0 n_{eff} \quad (11)$$

이 때 n_{eff} 는 도파로의 유효굴절율이다. (10)식에 적당한 경계조건을 주고 유한차분법에 의해 수치 해석적으로 풀면 고유치로부터 n_{eff} 와 고유함수인 $E_x(y)$ 를 구할 수 있다. 그림 3은 이러한 방법으로 구한 전기장의 분포 및 유효굴절율을 보여준다.

그림 1과 같은 동일한 도파로로 구성된 방향성 결합기의 경우 결합상수 및 결합길이는 다음과 같이 계산된다.

$$\kappa = \frac{2 q^2 p \exp(-ps)}{\beta(q^2 + p^2)(W + 2/p)} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \cdot q^2 &= N_w^2 k_0^2 - \beta^2 \\ \cdot p^2 &= \beta^2 - N_r^2 \\ l_0 &= \pi/2\kappa \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 l_0 는 결합길이, β 는 rib 도파로에서의 도파장의 전파상수, N_w 는 rib 부분의 유효굴절율, N_r 는 rib이 아닌 부분의 유효굴절율이다. 이 경우 결합상수는 기하학적 변수의 함수이므로 결합길이 또한 기하학적 변수로 계산할 수 있다.

결합모드 이론에 의한 전기장효과에 의해 생성된 위상차가 다음과 같을 때 완벽한 switching이 일어난다.

$$\Delta\beta = \frac{\sqrt{3} \pi}{l_0} \quad (14)$$

이 때 위상차는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\Delta\beta = \Delta n k_0 \quad (15)$$

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n_0^3 r E = -\frac{1}{2} n_0^3 r V/d \quad (16)$$

$$n_0^3 r = 49 \times 10^{-12} \text{ m/V for GaAs} \quad (17)$$

따라서 switching voltage는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(18)$$

여기서 d 는 도파로의 두께, n_0 는 굴절율, r 은 전기장 약계수이다. 이 때 overlap integral은 1로 가정하였다.

V. 진행파형 광변조기의 변조 특성

그림 1과 같은 구조의 진행파형 광변조기의 전류에 가해지는 초고주파의 진위는 그 감쇠를 고려하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V(z,t) = V_0 \exp(-\alpha_m z) \sin\left(\frac{2\pi N_m z}{\lambda_m} - 2\pi f t\right) \quad (19)$$

여기서 α_m 은 감쇠상수, λ_m 은 초고주파의 파장, N_m 은 초고주파의 굴절율, f 는 초고주파의 주파수, z 는 초고주파의 진행방향이다. 속도 부정합의 효과를 고려할 때 임의의 시간 t 에 도파로에 입사된 광자가 보는 초고주파의 진위차는 다음과 같다.

$$V(z,t) = V_0 \exp(-\alpha_m z) \sin\left\{ \frac{2\pi N_m f}{c_0} \left(1 - \frac{N_0}{N_m}\right) z - 2\pi f t \right\} \quad (20)$$

여기서 N_0 는 광파의 유효굴절율이다. 따라서 전기장 약치으로 생성된 총 위상차는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\beta_{tot}(f) &= \int_0^{l_c} \Delta\beta_0 \exp(-\alpha_m z) \sin(Bz - D) dz \\ &= \frac{\Delta\beta_0}{\alpha_m^2 + B^2} \{ B \cos D - \alpha_m \exp(-\alpha_m l_c) \sin(B l_c - D) \\ &\quad - B \exp(-\alpha_m l_c) \cos(B l_c - D) \} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} B &= \frac{2\pi f N_m}{c_0} \left(1 - \frac{N_0}{N_m}\right) \\ D &= 2\pi f t \\ \Delta\beta_0 &= \frac{n_0^3 r V_0 k_0}{2d} \end{aligned}$$

이와 같은 위상차를 갖을 때 결합모드 이론을 적용하면 빛이 입사된 반대편 arm에서의 빛의 세기는 다음과 같이 표현된다.

$$P(f,t) = \frac{\pi^2 e^{-\alpha_0 l_c}}{\pi^2 + \Delta\beta_{tot}^2(f,t)} \sin\left(\frac{1}{2} \sqrt{\Delta\beta_{tot}^2(f,t) + \pi^2}\right) \quad (22)$$

빛의 출력은 P_{max} 와 P_{min} 사이를 sine 함수적으로 변하므로 modulation depth를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$M = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max}} \quad (23)$$

위의 식들에서 주파수를 변화시켜가며 M 을 계산하면 3-dB 주파수를 구할 수 있다.

위와 같은 계산을 통하여 진극의 구조나 크기 및

초고주파의 진위에 대한 최적 조건을 고려하기 위하여 광변조기의 성능지수를 다음과 같이 생각할 수 있다. (11)

$$F_M = \frac{\lambda |1 + \Gamma| M_0 f_0}{V_m} \quad (19)$$

여기서 λ 는 도파관의 파장, Γ 는 초고주파 source와 전송선 사이의 반사계수, f_0 는 3-dB 주파수, M_0 는 낮은 주파수에서의 modulation depth, V_m 는 M_0 를 얻는데 필요한 초고주파의 진위차를 각각 나타낸다.

VI. 계산 결과 및 논의

1. 방향성 결합기

1.3 μ m 도파관의 파장에 대해 n^- 층의 두께가 3 μ m인 n^-/n^+ GaAs ($n^- \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $n^+ \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)인 평판 도파로, 두께 1 μ m의 Aluminium Schottky metal ($n = 1.71 + j 10.8$)에 대해 결합길이를 구하였다.

그림 4는 rib의 높이가 1 μ m일 때 기저모드만을 도파시키는 방향성 결합기의 결합길이를 계산한 것으로 결합길이는 도파로의 간격에 따라 지수적으로 증가하며, 동일한 도파로의 간격에서는 도파로의 너비가 클수록 크다는 것을 알 수 있다. 그림 5는 같은 경우에 대해 switching voltage를 구한 것으로 도파로의 간격에 따라 지수적으로 감소하고, 동일한 간격에 대해서는 너비가 클수록 감소한다는 것을 알 수 있다. 반도체상의 집적을 위해서는 소자의 길이가 짧고, 동작전압이 낮아야 유리한데 위의 계산결과에 비추어 보면 양자 사이에는 trade-off가 존재한다는 것을 알 수 있다.

2. 초고주파 전송선

그림 6, 7, 8은 초고주파 전송선의 너비가 5 μ m, 간격이 3 μ m, 5 μ m, 7 μ m일 때 초고주파의 감쇠, 초고주파가 느끼는 굴절률 및 Q-factor, impedance를 주파수의 함수로 구한 것이다. 그림 7, 8에서 진행파형 광변조기의 특성을 결정하는 전송선의 impedance 및 전송선에서의 초고주파의 굴절률은 간격이 증가함에 따라 증가하며, 또한 전 주파수영역에서 일정하게 유지된다. 따라서 전송선의 특성은 그 기하학적 변수에 의해 조정이 가능하다는 것을 알 수 있다. 그림 6에서 보는 바와 같이 주파수가 증가할수록, 간격이 증가할수록 초고주파의 감쇠는 증가한다. 따라서 방향성 결합기의 switching voltage를 작게하기 위해서는 간격을 증가시키면 소자의 길이가 증가하는 것 뿐만 아니라 단위길이당 초고주파의 감쇠가 증가하여 광변조기의 주파수 응답특성이 나빠진다는 것을 알 수 있다. 따라서 광변조기의 설계시 초고주파 전송선에 대한 고려가 필수적이라 할 수 있다.

3. 변조특성

그림 9는 $W=5\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$ 이고, $D=1\mu\text{m}$ 인 각각의 광변조기에 대해 동작전압이 10 volt일 때 그 성능지수를 도파로 사이의 간격의 함수로 계산한 결과이다. 이때 그림 9-(a)는 광손실이 1 dB/cm일 때의 결과이고 그림 9-(b)는 광손실이 3 dB/cm일 때의 결과이다. 그림 4와 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 도파로 사이의 간격이 커지면 switching voltage는 작아지고 결합길이는 커진다. 따라서 성능지수는 광손실에 의해 큰 영향을 받으며 각각의 도파로 너비에 대해 최대의 성능지수를 주는 도파로의 간격 또한 광손실에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 7에서 보는 바와 같이 간격이 커지면 초고주파가 느끼는 굴절률은 광파가 느끼는 굴절률 ($n_0 \sim 3.450$ for $\lambda = 1.3\mu\text{m}$)¹⁹⁾보다 커지게 된다. 따라서 GaAs 기반상의 방향성 결합기를 이용한 진행파형 광변조기의 경우 속도정합을 주는 구조보다는 switching voltage를 작게 해 주는 구조가 유리하다는 것을 알 수 있다. 그림 10은 그림 9-(b)와 같은 조건일 때 초고주파의 손실이 2 dB 만큼 줄었을 경우에 대한 계산결과로 성능지수의 최대값의 위치는 변하지 않고 그 크기

만 커졌다는 것을 알 수 있다. 따라서 초고주파의 손실 역시 진행파형 광변조기의 특성에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

VII. 결 론

GaAs 기반상의 Schottky 집속 전송선을 전극으로 하는 방향성 결합기를 이용한 진행파형 광변조기의 특성해석을 위한 모델 및 해석방법이 제시되었다. 초고주파의 전파특성은 quasi-TEM 모델에 의해 계산되었으며, 광파의 전파특성은 유효굴절률법과 고유치방법을 이용하여 수치 해석적으로 계산되었다.

방향성 결합기의 경우 결합길이는 도파로 사이의 간격이 커질수록 지수적으로 증가하였으며, 동일한 간격에 대해 도파로의 너비에 따라 증가하였다. 이와 관련하여 switching voltage는 도파로 사이의 간격에 따라 지수적으로 감소하고, 동일한 간격에 대해 너비의 증가에 따라 감소하였다.

GaAs 상의 Schottky 집속 전송선의 특성은 기하학적 변수에 크게 의존하며, 초고주파의 전파속도는 유전체에서와는 달리 광파의 전파속도와 크게 차이 나지 않았다.

초고주파의 손실과 광파의 손실을 고려한 변조특성의 계산 결과 광파 및 변조신호인 초고주파의 손실이 변조특성에 크게 영향을 미치며, 속도정합을 주는 구조보다는 switching volt-age를 작게하는 구조가 보다 유리함을 알았다. 또한 가장 좋은 변조특성을 주는 광변조기의 기하학적 변수를 계산할 통해 찾을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. R. G. Walker, J. Lightwave Technol., vol. LT-5, no. 10, pp. 1444, 1989
2. H. Hayashi, K. Tada, Appl. Phys. Lett., 57(3), pp. 227, 1990
3. R. C. Alferness, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-30, no. 8, pp. 1121, 1982
4. M. R. T. Tan, et. al., Electron. Lett., vol. 26 no. 1, pp. 32, 1990
5. S. Namba, J. Opt. Soc. Amer., vol. 51, pp. 76, 1961
6. H. Hasegawa, H. Okizaki, Electron. Lett., vol. 13, no. 22, pp. 663, 1977
7. D. Jäger, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-24, no. 9, pp. 566, 1976
8. Y. R. Kwon, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-35, no. 6, pp. 545, 1987
9. H. Takeuchi, et. al, J. Lightwave Technol., vol. 7, no. 7, pp. 1044, 1989

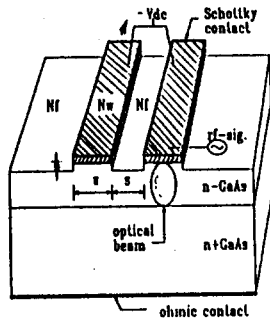


그림 1. 방향성 결합기를 이용한 진행파형 광변조기의 기막도.

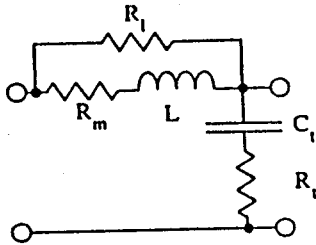


그림 2. 등가회로

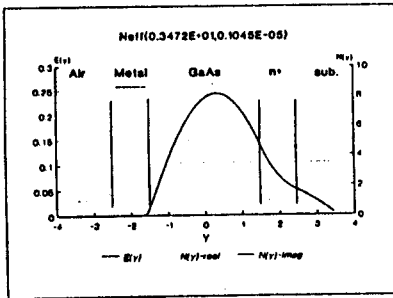


그림 3. 수치 해석적으로 계산한 반도체 평판도파로의 굽절율 및 modal field 분포.

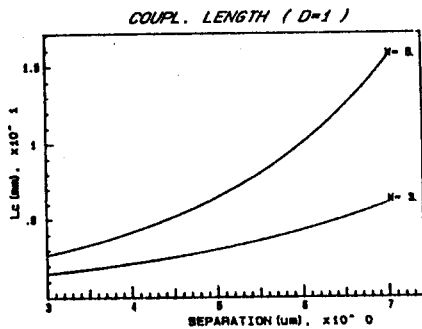


그림 4. 기하학적 변수에 따른 결합길이

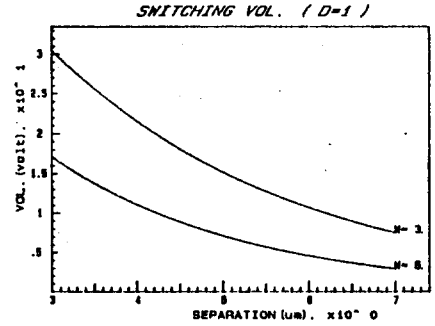


그림 5. 기하학적 변수에 따른 switching voltage

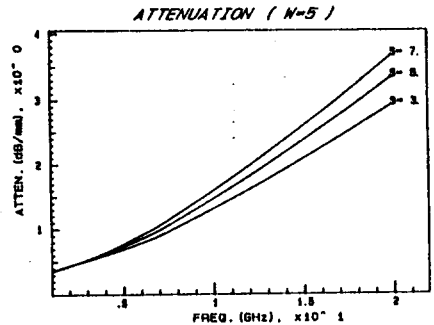


그림 6. 주파수에 따른 초고주파의 손실

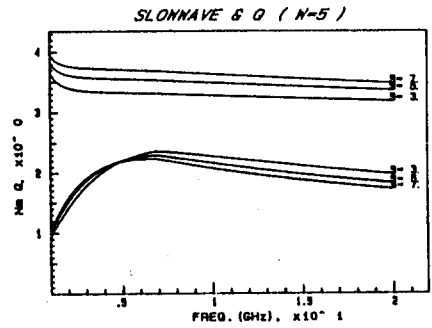


그림 7. 초고주파의 굽절율 (위)과 Q-factor

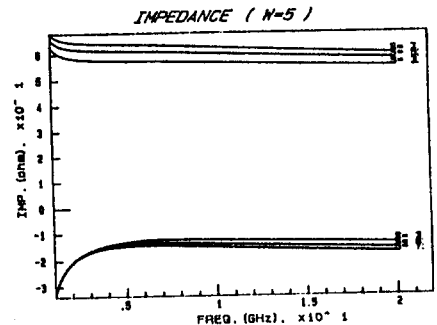


그림 8. 전송선의 characteristic impedance 윗 부분은 실수부, 아래 부분은 허수부

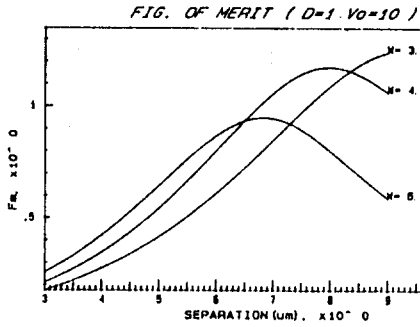


그림 9-(a) 기하학적 변수에 대한 성능지수 (1 dB/cm의 광손실의 경우)

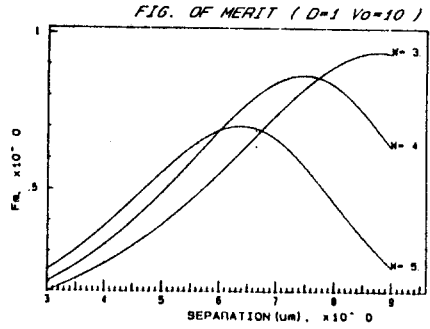


그림 9-(b) 기하학적 변수에 대한 성능지수 (3 dB/cm의 광손실의 경우)

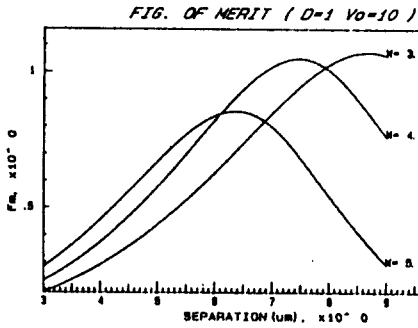


그림 10. 기하학적 변수에 대한 성능지수 (3 dB/cm의 광손실, 2 dB의 초과주파 손실증가)