

研究

完全導体フーリエ格子における回折効率の制御

松田 豊穂*・奥野 洋一**

* 熊本電波工業高等専門学校 〒861-11 熊本県菊池郡西合志町須屋 2659-2

** 熊本大学工学部電気情報工学科 〒860 熊本市黒髪 2-39-1

(1989年10月4日受理)

Control of Diffraction Efficiency of Perfectly Conducting Fourier Gratings

Toyonori MATSUDA* and Yoichi OKUNO**

* Kumamoto National College of Technology,
2659-2, Suya, Nishigoshi-cho, Kikuchi-gun, Kumamoto 861-11

** Department of Electrical Engineering and Computer Science,
Kumamoto University, 2-39-1, Kurokami, Kumamoto 860

Holographic gratings whose profiles are given by a superposition of a fundamental and its harmonics are called Fourier gratings. The dependence of the diffraction efficiency on the harmonics of perfectly conducting Fourier gratings is investigated through a systematic numerical study. As a result, it is shown that the phase of the second harmonic has large influence on the efficiency in the resonance domain where the wavelength is of the same order as the groove spacing. And it is demonstrated that in the domain, by controlling the phase of the second harmonic, we can optimize the performance of a Fourier grating, e.g., achieving a high efficiency, shifting the blaze wavelength or extending the blaze width, and controlling the polarization ratio.

1. まえがき

最近では、ホログラフィック回折格子^{1,2)}の溝形状の制御技術が進み、正弦波とその高調波（主に第2調波）を重ね合わせた形状を溝にもつ回折格子が製作できるようになった³⁻⁷⁾。このような回折格子は、ホログラフィック回折格子のなかでもとくにフーリエ格子と呼ばれている⁶⁾。フーリエ格子では、高調波の振幅や位相を変化させることで種々の溝形状を作ることができ、溝形状による回折効率の制御が期待できる。

フーリエ格子が考案された初期の目的は、エシェレット格子の溝形状（小階段状）を模造することであり^{4,5),*1},

基本波と第2調波を同位相で重ね合わせた擬鋸歯状の溝形状が主に作られていた。このため、フーリエ格子の高調波成分の位相が回折効率に及ぼす影響については、ほとんど調べられていないかった。

ところが、回折格子の溝形状と回折効率との関係を定量的に調べる研究が進み、波長が溝周期と同程度のいわゆる共振領域においては鋸歯状の溝が必ずしも高い回折効率を与える形ではないことがわかつってきた^{12,13)}。このようなことから、基本波と第2調波を位相差をつけて重ね合わせた、鋸歯状とは異なるフーリエ格子の回折効率についても調べられている^{6,14-16)}。しかしながら、第2調波のパラメータとくに位相が回折効率に及ぼす影響についての詳細な検討は行われていない。このため、フーリエ格子の高調波成分を制御することにより、フーリエ格子の高性能化や最適設計あるいは回折素子としての新たな用途の開発などを行うには、まだデータの蓄積が必要である。

*1 フーリエ格子に限らず、ホログラフィック回折格子における溝形状の制御はほとんどが鋸歯状の溝を作ることを目的としている⁸⁻¹⁰⁾。これは、波長が溝周期に比べて十分小さいスカラー領域で高い回折効率を有する溝形状が鋸歯状であることから^{9,11)}、波長が溝周期と同程度の共振領域においても鋸歯状の溝が高効率を有すると考えられていたためであろう。

本論文では、溝形状が基本波と第2調波あるいは第3調波からなるフーリエ格子を考え、溝形状のパラメータ（基本波の振幅および高調波の振幅・位相）が回折効率やその偏波依存性に及ぼす影響について検討する。とくに、従来はあまり調べられていなかった高調波の位相が回折効率に及ぼす影響について詳しく調べる。この結果、フーリエ格子の高調波成分とくに第2調波の位相を制御することで、(i) 高効率化、(ii) 回折効率が1となるブレーズ波長の推移あるいは広帯域化、(iii) 回折効率の偏波依存性的制御が可能であることを具体的に示す。なお、数値解析の方法としては、安浦の方法（モード整合法）¹⁷⁻²¹⁾を用いる。

2. フーリエ格子と回折効率

完全導体で作られた無限格子を考え、座標系を Fig. 1 のように定める。格子表面は x 方向に周期 d をもち、 z 方向には一様であると仮定する。格子断面の形状は、基本波と第2調波（あるいは第3調波）の重ね合わせ

$$y = \eta(x) = h \{ \sin 2\pi x/d + r \sin(2n\pi x/d + \delta) \} \quad (n=2, 3) \quad (1)$$

で与えられるものとする。

この格子に入射角 θ で波長 λ の平面波が入射すると、Fig. 1 に示すように、伝播方向 θ_m が回折格子の式²²⁾

$$\sin \theta - m\lambda/d = \sin \theta_m \quad (2)$$

で定まるいくつかの回折波が生じる。このときの m 次の回折波の回折効率を ρ_m^q ($q=s, p$) で表す。ここで、上添字 s と p は入射波の偏波を表し、それぞれ s 偏波（格子の溝方向に偏波：E波）と p 偏波（溝と垂直方向に偏波：H波）を意味する。回折効率 ρ_m^q ($q=s, p$) は、格子の周期で規格化した入射波の波長 (λ/d)、入射角 (θ) および溝形状のパラメータ ($h/d, \gamma, \delta$) により定まる

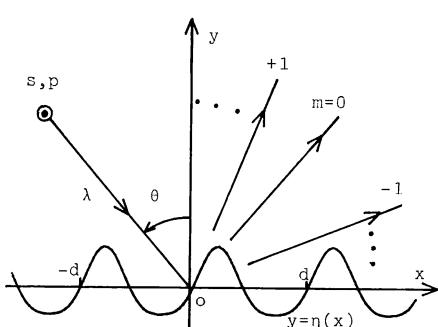


Fig. 1 The cross section of a Fourier grating.

量である²²⁾。

次章以降で、この回折問題を平滑化操作を伴うモード整合法¹⁹⁻²¹⁾を用いて解析し、溝形状のパラメータ ($h/d, \gamma, \delta$) が回折効率 ρ_m^q に及ぼす影響について検討する。なお、入射波や回折波の具体的な関数形および回折効率の表示式については、文献 22) あるいは 15) や 18) を参照されたい。

3. 回折効率の形状依存性 (第2調波重畠の場合)

本章では、基本波と第2調波を重ねたフーリエ格子の溝形状と回折効率との関係について調べる。実際に作られているフーリエ格子のほとんどが、この基本波と第2調波を重ねたものである³⁻⁷⁾。

3.1 形状パラメータ ($h/d, \gamma, \delta$) の影響

1次のリトロー配置²²⁾では、

$$\theta = -\theta_1 = \sin^{-1} \lambda/2d \quad (3)$$

が成立し、 λ/d を与えると回折効率 ρ_m^q は溝形状のパラメータ ($h/d, \gamma, \delta$) だけで定まる^{*2}、そこで、 λ/d が 1 (伝播モード数は 2 個) と 0.5 (伝播モード数は 4 個) の場合について、溝形状のパラメータ ($h/d, \gamma, \delta$) の値を変化させたときの回折効率の変化を調べてみる。

(a) 回折効率の h/d 依存性

最初に、基本波の振幅（を格子の周期で規格化した h/d ）が回折効率 ρ_m^q ($q=s, p$) に及ぼす影響を調べる。Fig. 2 は、 γ の値を 0.2 に固定し、 δ をパラメータとして、 h/d を 0 から 0.3 まで変化させたときの 1 次の回折効率 ρ_1^q ($q=s, p$) を示したものである。 h/d により溝形状の深さが変化するが、このときの溝形状の概形を図の右側に示す。

Fig. 2 から、基本波の振幅 h/d は回折効率を定める主要なパラメータであり、 h/d により回折効率を広範囲にわたって制御しうることがわかる。また、効率曲線は δ の値によりそれぞれ異なっており、回折効率が δ の影響を受けその程度が h/d の増加に伴い大きくなることが確かめられる。したがって、基本波の振幅 h/d がある程度大きいフーリエ格子では、第2調波の振幅や位相により回折効率の値が大きく変化する。たとえば、 $\lambda/d=1$ のとき (Fig. 2(a)), h/d が 0.22 付近で s 波および p 波の回折効率は、 δ の値によって 40% 程度異なる。なお、伝播モードが 4 個である $\lambda/d=0.5$ (Fig. 2

*2 実際の回折格子の配置では入射波の到来方向と 1 次の回折波の伝播方向がずれることがあり、この角度のずれは A.D. (angular deviation) と呼ばれている。通常、A.D. により、1 次の回折効率は低下する¹²⁾。

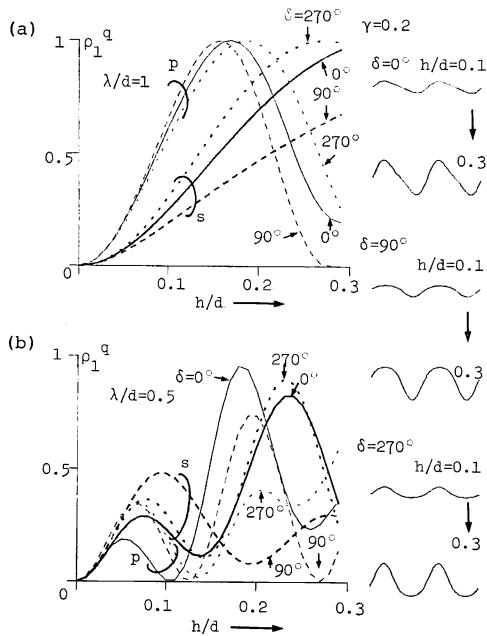


Fig. 2 Dependence of the efficiency ρ_1^q ($q=s, p$) on h/d . ($n=2, \gamma=0.2$)

(b)) では、回折効率曲線の変化が激しく、パラメータ δ の値により特性も大きく異なる。

(b) 回折効率の γ 依存性

Fig. 3 は、 h/d を 0.2 に固定し、 δ をパラメータとして、 γ を 0 から 0.4 で変化させたときの回折効率曲線 ρ_1^q ($q=s, p$) を示したものである。Fig. 3 (a) ($\lambda/d=1$) からわかるように、回折効率は γ にはほぼ比例した形で変化し、その傾きは δ に依存している。 δ の値が 0° のときは、回折効率に関する等価則^{13),*3} が成立し、効率曲線はほとんど一定であり、基本波の振幅 h/d で回折効率がほぼ決まることが確かめられる。

また、 $\lambda/d=0.5$ (伝播モードが 4 個) のとき、回折効率は γ の影響を強く受け、 γ により制御できる回折効率の範囲は広くなる。

(c) 回折効率の δ 依存性

Fig. 4 は、 $h/d=0.2$ とし γ をパラメータとして、 δ

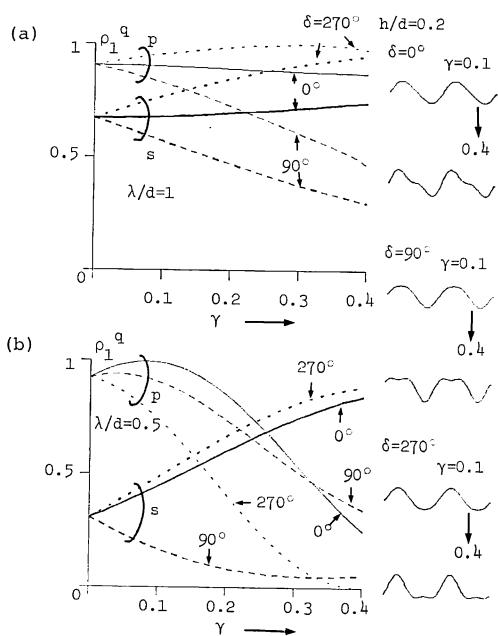


Fig. 3 Dependence of the efficiency ρ_1^q ($q=s, p$) on γ . ($n=2, h/d=0.2$)

を 0° から 360° まで変化させたときの効率曲線 ρ_1^q ($q=s, p$) を示したものである。 $\lambda/d=1$ のとき、回折効率 ρ_1^q ($q=s, p$) は δ に対して定在波状に変化し、 $\delta=90^\circ$ 付近で最小、 270° 付近で最大となる。この定在波の振幅は、Fig. 3 (a) からわかるように、 γ の値にはほぼ比例す

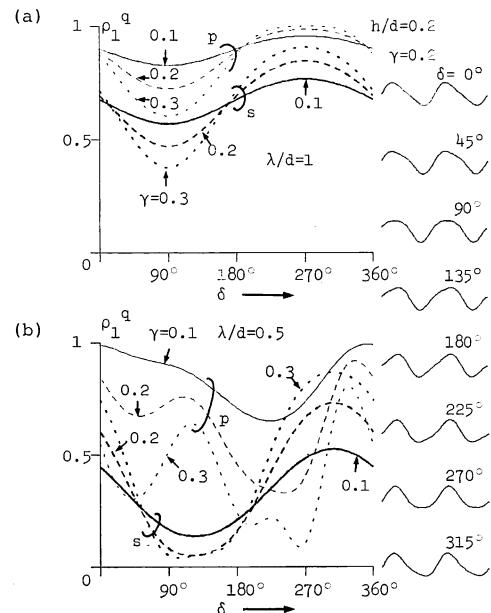


Fig. 4 Dependence of the efficiency ρ_1^q ($q=s, p$) on δ . ($n=2, h/d=0.2$)

*3 文献13) の回折効率に関する等価則：次の条件

(i) 溝形状が周期 d の正弦波のフーリエ級数 $\left(y = \sum_{n=1}^{\infty} h_n \sin 2n\pi x/d \right)$ で表される。

(ii) 2 個のモードだけが伝播する。

の下では、回折効率は基本波の振幅 (h/d) でほぼ決まり、高調波成分 (h_n/d : $n=2, 3, \dots$) の影響は少ない。この等価則によれば、正弦波状格子・エシェレット格子・ラメラーグ子など通常用いられる格子の回折効率が、伝播モードが 2 個である周波数帶でほぼ等しくなる事実はある程度理論的に説明できる^{12, 13)}。

Table 1 Dependence of diffraction efficiencies ρ_1^q ($q=s, p$) on parameters of groove profile provided that only two orders propagate.

Parameter	Influence on the efficiency	Figure
h/d	• h/d is a dominant parameter: the range where ρ_1^q can be varied by controlling γ or δ is decided by h/d . {	2(a)
γ	• ρ_1^q depends linearly on γ ; δ decides the gradient.	3(a)
δ	• ρ_1^q varies like a standing wave as a function of δ ; γ decides the amplitude. • ρ_1^q is symmetric with respect to $\delta=90^\circ$ and 270° when δ is varied. • ρ_1^q depends on almost entirely on h/d when δ is equal to 0° or 180° .	4(a) 3(a)

るものである。また、回折効率の曲線は、 $\delta=90^\circ$ (あるいは 270°)を中心に対称である。このことは、回折格子に関する相反定理²²⁾から説明することができる (付録A参照)。この δ に関する対称性は、回折格子の配置^{1,2)}やレプリカ技術^{1,2)}などに応用できる重要な性質である。

λ/d の値が 0.5 では (Fig. 4 (b)), 回折効率は δ の影響を強く受けるようになり、広範囲にわたって回折効率が変化する。また、s 波と p 波で、回折効率の δ 依存性が大きく異なる。

(d) 3.1 節のまとめ

以上、 λ/d の値を 1 と 0.5 に固定し、回折効率の溝形状パラメータ ($h/d, \gamma, \delta$) 依存性を調べた。伝播モードが 2 個である $\lambda/d=1$ のときの溝形状パラメータが回折効率に及ぼす影響をまとめて Table 1 に示す。

一方、 λ/d が 0.5 で伝播モードが 4 個になると、回折効率は溝形状に非常に敏感であり、溝形状のパラメータ

と回折効率との一般的な関係を簡潔に述べることは難しい。もっとも、平滑化操作を伴うモード整合法により回折効率を求めるることはできるので、形状パラメータと回折効率との関係を数値的に調べることは可能である。

3.2 回折効率の波長特性

次に、1 次のリトロー配置の下に λ/d を 0.2 から 2 まで変化させたときの、フーリエ格子の回折効率 ρ_1^q ($q=s, p$) を Fig. 5 に示す。この図では、基本波の振幅が同じで ($h/d=0.2$)、第 2 調波の位相(δ)が異なるフーリエ格子の回折効率曲線 $\rho_1^q(q=s, p)$ を比較している。回折効率の特性は、伝播モードの個数が 2 個の区間 ($2/3 < \lambda/d < 2$) と 4 個の区間 ($2/5 < \lambda/d < 2/3$) で大きく異なる。ここでは、区間 ($2/3 < \lambda/d < 2$)において、高調波成分が回折効率の波長特性に及ぼす影響をまとめて以下に示す。

(1) 正弦波状格子および $\delta=0^\circ$ のフーリエ格子は、

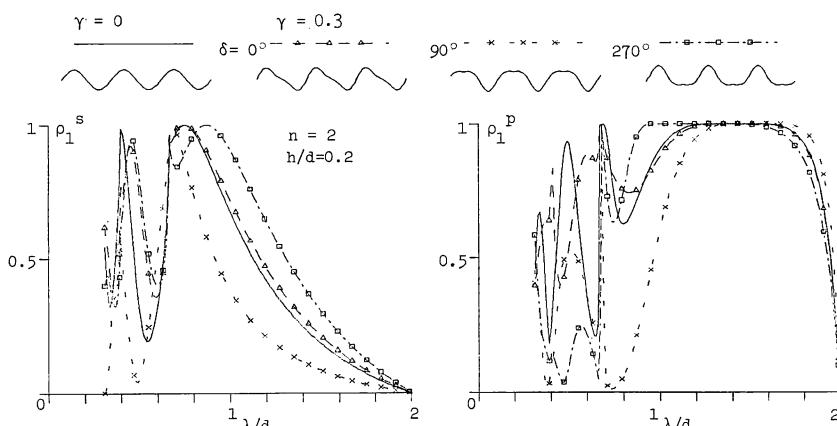


Fig. 5 Efficiency curves in the 1st-order Littrow mounting for Fourier gratings with a same fundamental amplitude. ($n=2$, $h/d=0.2$)

区間 ($2/3 < \lambda/d < 2$)においてほぼ等しい特性を有する [文献 13] の等価則].

(2) 回折効率が 1 となる波長は、ブレーズ波長と呼ばれる。s 波において、ブレーズ波長は、 δ を 90° 付近に選ぶことで短波長側へ、 270° ($= -90^\circ$) 付近に選ぶことで長波長側へずれる。このときのずれは、 γ の値に依存し、 γ の値を大きくするとずれの幅も大きくなる。

(3) 一方、p 波では、 δ の値によりブレーズ波長の幅が変化し、 δ を 270° 付近に選ぶことでブレーズ波長の幅を広めることができる。

Fig. 6 は、p 波と s 波の回折効率の比で定義される偏波比²³⁾ ρ_{1s}/ρ_{1p} の波長特性を示したものである。パラメータや曲線の種類は、Fig. 5 と同じである。この図から、次のことがいえる。

(4) 回折効率の偏波依存性を δ により制御できる。
以上、 $h/d=0.2$ のフーリエ格子において、その高調波成分とくに位相 δ により、ブレーズ波長やブレーズ幅および回折効率の偏波依存性を制御しうることがわかった。このような回折効率の制御を、エシェレット格子など機械刻線格子で実現することは難しく、第 2 調波の位相による回折効率の制御は、フーリエ格子の優れた特長の一つといえる。

なお、 δ が 0° (あるいは 180°) のフーリエ格子は、擬鋸歯状であり、エシェレット格子の代用として考えられている^{4,5)}。1 次のリトロー配置の場合 (Fig. 5 参照)、 $\lambda/d > 0.4$ においてエシェレット格子とその溝形状を基本波と第 2 調波で近似したフーリエ格子とではそれほど大きな効率の差は見られず、フーリエ格子による代用は実用上ほとんど問題ないと思われる。

3.3 実験値との比較

伝播モードが 2 個のときの、フーリエ格子の最適形状

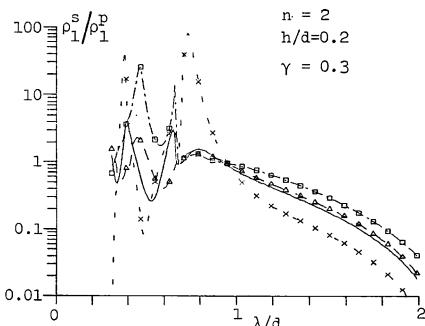


Fig. 6 1st-order polarization ratio ρ_{1s}/ρ_{1p} as functions of λ/d for the same conditions as in Fig. 5 ($n=2$, $h/d=0.2$, $\gamma=0.3$)

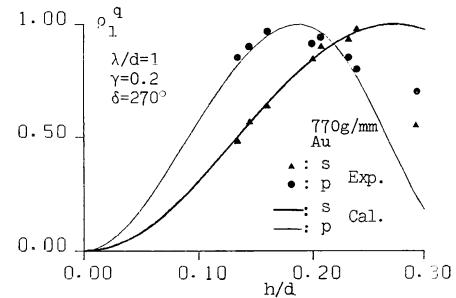


Fig. 7 Comparison with the experimental data in Ref. (7) ($n=2$, $\gamma=0.2$, $\delta=90^\circ$, $\lambda/d=1$).

の一つに、 $h/d=0.2$, $\gamma=0.2$, $\delta=270^\circ$ が考えられる。ここでは、この設計指針の下に実際に製作されたフーリエ格子⁷⁾ の回折効率について考察する。Fig. 7 は、 $\gamma=0.2$ で $\delta=270^\circ$ の h/d が異なるフーリエ格子の回折効率の実験値 (s 波: ▲; p 波: ●) と計算値 (s 波: 太線; p 波: 細線) を比較したものである。実際に製作された格子は、格子定数が 770 本/mm で金でコーティングされたものである。 h/d が 0.22 付近で、s 波で 90 %, p 波で 94 % 程度の高い回折効率が測定され、その値は本論文の数値例とほぼ一致している。このように、 h/d が 0.25 程度までは、実験値と計算値は比較的良好に一致しているが、 h/d が 0.3 ぐらいからずれてくる。この原因の一つとして、 h/d が 0.3 以上では製作誤差が大きくなる可能性があり、実際に製作された溝形状が数値計算に使用されたものと多少異なることが考えられよう。

3.4 その他の数値例

リトロー配置以外の数値例を示す。Fig. 8 は、 $\gamma=0.2$ のフーリエ格子に、 $\lambda/d=1/1.9$ の入射波が垂直入射 ($\theta=0^\circ$) したときの、基本波の振幅に対する回折効率の変化を示したものである。この場合、0 次、1 次、-1 次の 3 個のモードが伝播し、溝形状が対称となることから 1 次と -1 次の回折効率は等しくなる。

正弦波状格子に対する回折効率の h/λ 特性は、これまでに求められており、定在波状になることが知られている²⁴⁾。Fig. 8 は、この h/λ 特性を δ の値が 90° および 270° のフーリエ格子について調べたものであり、 δ による h/λ 特性の変化を知ることができる。 $\delta=90^\circ$ の場合、s 波、p 波ともに回折効率の h/λ 特性は、正弦波状格子と同様に定在波状となる。ところが、 δ が 270° になると、 $h/\lambda > 0.25$ において p 波の特性が定在波からずれてくる。ただし、 $h/\lambda < 0.25$ では s 波と p 波の回折効率はほぼ等しくなり、回折効率の偏波依存性が少なく

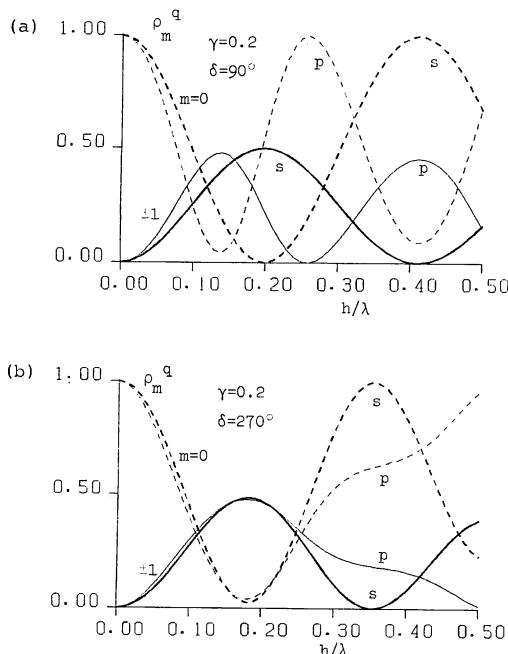


Fig. 8 Efficiency curves ρ_m^q as functions of h/λ in normal incidence ($n=2, \gamma=0.2, d=1.9\lambda, \theta=0^\circ$).

なる。そこで、0次の効率が最小となる h/λ において ($h/\lambda=0.19$)、 $\delta=270^\circ$ のフーリエ格子を偏波依存性の少ないビームスプリッターとして利用できる。

4. 回折効率の形状依存性

(第3調波重畠の場合)

基本波と第3調波を重ね合わせることで、第2調波を重ねた場合とは異なる溝形状を作ることができる。本章

では、このフーリエ格子の高調波成分（第3調波の振幅および位相）が回折効率に及ぼす影響について調べる。

Fig. 5 に対応して、第3調波を重畠したフーリエ格子の回折効率の波長特性を Fig. 9 に示す。この図で、ブレーズ波長（ s 波）やブレーズ波長の幅（ p 波）に大きな変化は見られず、フーリエ格子の特性は正弦波格子のそれとほぼ同じものである。また、伝播モードが4個となる区間 ($2/5 < \lambda/d < 2/3$) においても、フーリエ格子の波長特性は、 δ を変化させても正弦波状格子の特性からそれほど大きく離れない。

このように、第3調波を重畠したフーリエ格子では、第3調波の振幅や位相が回折効率に及ぼす影響は、あまり大きくない。実際、その影響の程度は、第2調波を重畠した場合に比べてかなり小さいものである。

5. む　す　び

溝周期と入射波の波長が同程度である共振領域において、フーリエ格子の溝形状パラメータ（基本波の振幅、高調波の振幅・位相）が回折効率に及ぼす影響について調べた。この結果、次のことを明らかにした。

- (1) 基本波と第2調波を重畠したフーリエ格子においては、第2調波の位相が回折効率に及ぼす影響は大きく、第2調波の位相により、高効率化や回折効率の偏波依存性の制御を行うことが可能である。
- (2) 第3調波が回折効率に及ぼす影響は小さく、その程度は第2調波のパラメータにより制御しうる範囲内である。

以上で得られた結果は、フーリエ格子の一つの設計指針を与えるものと考えられる。とくに、フーリエ格子を使用波長領域が限定される光通信用デバイスの波長分散

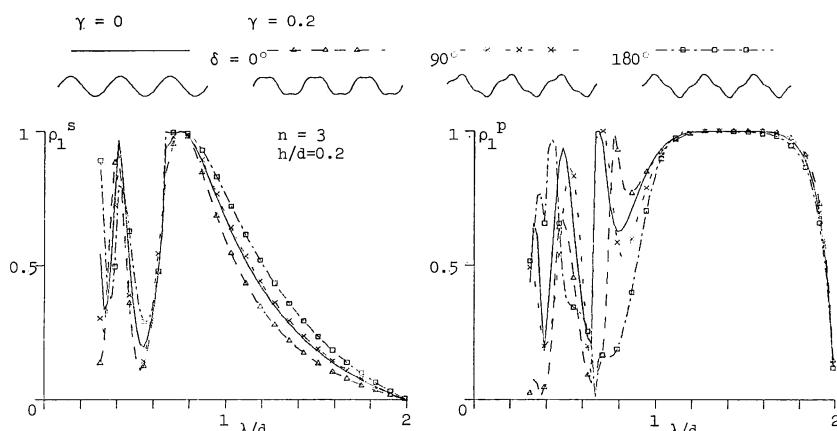


Fig. 9 Efficiency curves in the 1st-order Littrow mounting for Fourier gratings with a same fundamental amplitude. ($n=3, h/d=0.2$).

素子として利用する場合など、第2調波の振幅や位相の最適化により高性能な分散特性の実現が期待できる。

本論文では、格子の材質は完全導体としており、マイクロ波領域から赤外領域については、この仮定が十分成立する。ところが、入射波の波長が可視領域以下になると、格子の材質の損失が無視できなくなる¹²⁾。ただし、可視領域においても、電気伝導率の大きな材質で作られた格子の場合には、完全導体による近似によって回折効率の大まかな特性を把握することができる。格子の損失が小さい場合、完全導体格子との主な特性の違いは、回折効率が多少低下することやアノマリの減少程度である¹²⁾。しかし、格子の損失が大きくなると、本論文の結果から実際の格子の特性を予想することが難しくなると考えられる。このような場合には、2媒質境界値問題としての定式化および解析が必要である^{12,14,16,25)}。今後は、材質に損失を考慮したフーリエ格子について、その設計や応用に有用となるデータを収集していく予定である。

日頃ご指導いただき、熊本大学板倉徳也教授、生野浩正教授に深謝します。また、本論文の投稿に際し、有益なご助言をいただいた東京大学神谷武志教授に感謝します。なお、Fig. 7 の実験値は、松下電器開発研究所萩原清和氏等のご提供によるものです。

文 献

- 1) M.C. Hutley: "The manufacture of gratings," *Diffraction Gratings* (Academic Press, London, 1982) pp. 71-127.
- 2) 永田 浩: "回折格子," 光工学ハンドブック, 小瀬輝次, 斎藤弘義, 田中俊一, 辻内順平, 波岡 武編 (朝倉書店, 東京, 1986) pp. 527-544.
- 3) M. Breidne, S. Johansson, L-E. Nilsson and H. Åhlén: "Blazed holographic gratings," *Opt. Acta*, **26** (1979) 1427-1441.
- 4) R.C. McPhedran, I.J. Wilson and M.D. Waterworth: "Profile formation in holographic diffraction gratings," *Opt. Laser Technol.*, **5** (1973) 166-171.
- 5) G. Schmahl: "Holographically made diffraction gratings for the visible, UV and soft X-ray region," *J. Spectrosc. Soc. Jpn.*, **23**, Suppl. 1 (1974) 3-12.
- 6) P. Bliek, R. Deleuil, M. Breidne and D. Maystre: "Microwave verification of a numerical optimization of Fourier gratings," *Appl. Phys.*, **24** (1981) 147-150.
- 7) 飯田正憲, 萩原清和, 朝倉宏之: "長波長帯用ホログラフィック回折格子," 昭和63年度電子情報通信学会春季全国大会講演論文集, C-469 (1988).
- 8) N.K. Sheridan: "Production of blazed holograms," *Appl. Phys. Lett.*, **12** (1968) 316-318.
- 9) 波岡 武: "ホログラフィックグレーティングの溝の形の制御 I. 光学的方法," 応用物理, **45** (1976) 655-656.
- 10) 青柳克信, 難波 進: "ホログラフィックグレーティングの溝の形の制御 II. イオンエッチングによる方法," 応用物理, **45** (1976) 657-662.
- 11) E.G. Lowen, M. Neviere and D. Maystre: "On an asymptotic theory of diffraction gratings used in the scalar domain," *J. Opt. Soc. Am.*, **68** (1978) 496-502.
- 12) D. Maystre, M. Nevière and R. Petit: "Experimental verifications and applications of the theory," *Electromagnetic Theory of Gratings*, ed. R. Petit (Springer-Verlag, Berlin, 1980) pp. 159-226.
- 13) M. Breidne and D. Maystre: "Equivalence of ruled, holographic, and lamellar gratings," *Appl. Opt.*, **19** (1980) 1812-1821.
- 14) M. Breidne and D. Maystre: "A systematic numerical study of Fourier gratings," *J. Opt. (Paris)*, **13** (1982) 71-79.
- 15) Y. Okuno and T. Matsuda: "Efficient technique for the numerical solution of diffraction by a Fourier grating," *J. Opt. Soc. Am. A*, **4** (1987) 465-472.
- 16) 中田康則, 小柴正則: "任意の複素誘電率を有する金属格子による平面波回折の境界要素法解析", 電子情報通信学会論文誌 C, **J71-C** (1980) 1412-1418.
- 17) 安浦亀之助, 板倉徳也: "波動関数の近似法について I, II および III", 九大工学雑報, **38** (1965) 72-77; **38** (1966) 378-385; **39** (1966) 51-56.
- 18) H. Ikuno and K. Yasuura: "Improved point-matching method with application to scattering from a periodic surface," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **AP-21** (1973) 657-662.
- 19) 安浦亀之助: "境界値問題の数值解法", 電磁界の近代解析法, 飯島泰蔵監修 (電子通信学会, 1979) pp. 57-117.
- 20) 奥野洋一: "モード整合法", 電磁波問題の基礎解析法, 山下栄吉監修 (電子情報通信学会, 1987) pp. 93-164.
- 21) H. Ikuno and K. Yasuura: "Numerical calculation of the scattered field from a periodic deformed cylinder using the smoothing process on the mode-matching method," *Radio Sci.*, **13** (1978) 937-946.
- 22) R. Petit: "A tutorial introduction," *Electromagnetic Theory of Gratings*, ed. R. Petit (Springer-Verlag, Berlin, 1980) pp. 1-52.
- 23) P.M. van den Berg: "Diffraction theory of a reflection grating," *Appl. Sci. Res.*, **24** (1971) 261-293.
- 24) K.A. Zaki and A.R. Neureuther: "Scattering from a perfectly conducting surface with a sinusoidal height profile: TE polarization," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **AP-19** (1971) 208-214; "TM polarization," *ibid.*, **AP-19** (1971) 747-751.
- 25) 安浦亀之助, 村山正直: "損失を考慮にいた正弦波状格子による回折問題の数值解析", 電子通信学会論文誌 B, **J69-B** (1986) 198-204.

付 錄

A. 回折効率の δ に関する対称性の説明

回折格子に関する相反定理²²⁾によれば、 $y = \eta(x)$ と $y = \eta(-x)$ の 0 次の回折効率は等しい。また、回折効率は、溝形状を x 軸方向に平行移動しても変わらない。つまり、 $y = \eta(x)$ と $y = \eta(-x - d/2)$ の 0 次の回折効率は同じである。したがって、基本波と第2調波を重畠したフーリエ格子では

$$\eta(-x - d/2) = h \{ \sin 2\pi x/d + \gamma \sin (4\pi x/d + \pi - \delta) \}$$

(A. 1)

であるため, h/d および γ が同じなら, $\delta_1=\delta$ と $\delta_2=\pi-\delta$ の 0 次の回折効率は等しく, 次のことがいえる:

(i) h/d および γ を固定して δ を変化させたときに, 0 次の回折効率 ρ_{0^q} ($q=s, p$) は $\delta=\pi/2$ (あるいは $3\pi/2$) を中心に対称な特性となる;

(ii) とくに, 伝播モードが 2 個だけ (0 次と 1 次)

のときは, エネルギー保存則から $\rho_{0^q}+\rho_{1^q}=1$ ($q=s, p$) が成り立つため, δ に関する対称性は, 0 次だけでなく 1 次の回折効率 ρ_{1^q} ($q=s, p$) に対しても成立する (Fig. 4 (a) 参照).