

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

P13-85-413

М.В. Ляблин, Г.В. Цепилов

ГЕТЕРОДИННЫЙ ДЕТЕКТОР ИК-ДИАПАЗОНА
В СХЕМЕ ПРИЕМНИКА ГРАВИТАЦИОННОЙ ВОЛНЫ

1985

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ДЕТЕКТОРА

Для приема гравитационной волны используется метод параметрического смешивания волн на атомах щелочных металлов^{1,2}. В результате когерентного параметрического взаимодействия гравитационной волны с электромагнитными волнами накачки ожидается поток фотонов сигнала со следующими параметрами: мощность излучения $P_c = 2 \cdot 10^{-12}$ Вт; длительность импульса $\tau = 10^{-6}$ с, длина волны $\lambda = 10$ мкм; ширина полосы частот излучения $\Delta f = 10^8$ Гц; угловая расходимость пучка сигнального излучения $\Delta\Omega = 10^{-4}$ рад.

Регистрация столь слабого сигнала решается с применением гетеродинного способа регистрации света в инфракрасном /ИК/ диапазоне. Суть этого метода заключается в следующем. Два оптических поля - сигнальное $E_c \cos \omega_c t$ и гетеродинное $E_r \cos \omega_r t$ совмещаются в пространстве таким образом, чтобы направления волновых векторов K_c и K_r совпадали. Затем общее поле E подается на чувствительную площадку фотодетектора. Поскольку любой фотодатчик регистрирует мощность излучения, то мощность, принимаемая фотодетектором будет

$$P = P_c \cos^2 \omega_c t + P_r \cos^2 \omega_r t = \frac{1}{2} 2 \sqrt{P_c P_r} [\cos(\omega_c - \omega_r) t + \cos(\omega_c + \omega_r) t]. \quad /1/$$

На выходе фотодетектора образуется ток $i = \frac{\eta e}{h\nu} P = AP$, где η - квантовая эффективность фотодетектора; e - заряд электрона; h - постоянная Планка; ν - частота излучения. Колебания с частотами ω_c , ω_r , $\omega_c + \omega_r$ усредняются в постоянный ток $i_n = i_c + i_r$, а составляющая с частотой $\Delta\omega = \omega_c - \omega_r$ попадает в диапазон регистрируемых частот модуляции. Эта разностная компонента образует переменный ток, который является сигнальным в электронном тракте фотоприемника. Общий ток имеет вид

$$i = i_c + i_r + 2 \sqrt{P_c P_r} \cdot A \cdot \cos \Delta\omega t. \quad /2/$$

Оценим теперь уровень шумов, возникающих в фоторезисторе Ge: Cu (Sb) /табл. /, используемом в схеме гетеродинного приемника.

Таблица

Тип фотодетектора	Диапазон длин волн $\Delta \lambda$ (мкм)	Максимум спектральной характеристики λ (мкм)	Квантовая эффективность η	Температура на входе приемника (К)	Постоянная времени τ (с)	Полоса частот Δf (Гц)	Темновое сопротивление R_H (Ом)	Пороговая мощность $P_{пор}$	Площадь фоточувствительной поверхности S (см ²)
Фоторезистор Ge: Hg	2-14	10,6	0,5	4,2	$3,3 \cdot 10^{-9}$	10^6	$5 \cdot 10^5$	$(0,7-1,7) \cdot 10^{-10}$	0,25-2
Фоторезистор Ge: Hg (Sb)	8-14	11	0,5	4,2	$3 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^5$	$0,6 \cdot 10^{-10}$	
Фоторезистор Ge: Cu	3-30	22	0,5	4,2	$2 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^8$	$10^3 \cdot 10^5$	$(0,67-1) \cdot 10^{-10}$	
Фоторезистор Ge: Cu (Sb)	2-27	23	0,56	4,2	$2 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^3$	$0,5 \cdot 10^{-10}$	
Фотодиод Hg, Cu, Te	8-14	11	0,3	77	$10^{-9}-10^{-10}$	10^6-10^9	$3 \cdot 10^3$	$0,3 \cdot 10^{-10}$	10^{-4}
Фотодиод Pb, Sn, Te	1-12,8	11,4	77	77	-	300	$0,5 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-3}$	

Дробовой шум, возникающий из-за дискретности носителей тока. Его величина $\langle i_{др}^2 \rangle$ в полосе частот приема Δf дается формулой Шоттки:

$$\langle i_{др}^2 \rangle = 2eA \cdot P_r \Delta f. \quad /3/$$

Для мощности гетеродина $P_r = 10^{-5}$ Вт; $\langle i_{др}^2 \rangle = 1,7 \cdot 10^{-15} \text{ а}^2$.

Генерационно-рекомбинационный шум, связанный с флуктуациями скоростей генерации и рекомбинации носителей тока в веществе полупроводникового фотодетектора:

$$\langle i_{г-р}^2 \rangle = \langle i_{др}^2 \rangle \cdot \frac{2 \frac{\tau_0}{\tau_d}}{1 + f^2 \frac{\tau_0^2}{4\pi^2}}. \quad /4/$$

где τ_0 - время жизни и τ_d - время дрейфа носителей тока на длине d ; f - частота модуляции тока.

Для выбранного фотодетектора эти параметры равны $\tau_0 = 10^{-9}$ с, $\tau_d = 3 \cdot 10^{-8}$ с, $f = 10^9$ Гц. Следовательно, $\langle i_{г-р}^2 \rangle = 1,6 \cdot 10^{-3} \langle i_{др}^2 \rangle$.

Фотонный шум, обусловленный существованием излучения от нагретых элементов конструкции, окружающих фотодетектор:

$$\langle i_{\phi}^2 \rangle = 2eP_{\phi} \Delta f; \quad P_{\phi} = P_{\phi пор}^* \sqrt{S \Delta f \Delta \Omega};$$

$$P_{\phi пор}^* = \frac{2\sqrt{\pi h k T}}{c \sqrt{\eta}} V_0^2 \exp\left[-\frac{h\nu}{2kT}\right] \cdot \left\{ 1 + 2 \frac{kT}{h\nu} + 2 \left(\frac{kT}{h\nu}\right)^2 \right\}.$$

$$S_{\phi н} = 10^{-4} \text{ см}^2; \quad \Delta f = 10^8; \quad \Delta \Omega = 10^{-4} \text{ рад}^2. \quad /5/$$

$$T = 300^\circ \text{ К}; \quad \langle i_{\phi}^2 \rangle = 3 \cdot 10^{-9} \langle i_{др}^2 \rangle.$$

Тепловой шум, связанный с температурой вещества фотодетектора, $\langle i_T^2 \rangle$ имеет величину

$$\langle i_T^2 \rangle = 4kT \frac{1}{R} \Delta f = 1,3 \cdot 10^{-3} \langle i_{др}^2 \rangle. \quad /6/$$

где R - темновое сопротивление фотодетектора, T - температура вещества фотодетектора, k - постоянная Больцмана.

Из проведенного рассмотрения видно, что доминирующим шумом является дробовой. Вычислим теперь отношение сигнала к шуму S/N :

$$S/N = \frac{\langle i_c^2 \rangle}{\langle i_{др}^2 \rangle} = \eta \frac{P_c}{h\nu \Delta f}. \quad /7/$$

Используя параметры принимаемого сигнала, определим отношение S/N: $S/N = 3$. Из условия $S/N = 1$ определим пороговую мощность,

$$P_{c \text{ пор}} = \frac{1}{\eta} h\nu \Delta f. \quad /8/$$

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ ДЕТЕКТОРА

Рассмотрим вопросы технической реализации гетеродинного оптического приемника. Начнем с выработки условий согласования оптических элементов устройства с фотодетектором. Эти условия выведем из коэффициента преобразования гетеродинного приемника /4/:

$$K = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{P_c}{P_{\text{вх}}} \cdot \frac{P_{\text{вых}}}{P_c} = \lambda L, \quad /9/$$

где $P_{\text{вых}}$ - мощность токового сигнала на выходе фотодетектора; P_c - мощность оптического сигнала, подаваемая на фотодетектор; $P_{\text{вх}}$ - мощность сигнала, перехватываемая апертурой гетеродинного приемника; λ - коэффициент преобразования оптической схемы; L - коэффициент преобразования фотодетектора:

$$L = 2 \cdot A^2 P_r \cdot R \cdot \kappa, \quad /10/$$

где κ - коэффициент, учитывающий степень несовпадения амплитудно-фазовых распределений оптических лучей сигнала и гетеродина на фотодетекторе. Коэффициент κ изменяется от 1 - полное согласование до 0 - отсутствие согласования. Можно привести три наиболее характерных случая смешивания этих волн.

а. В интерферирующих плоских волновых полях существует линейная фазовая ошибка, набегающая из-за неколлинеарности распространения сигнала и гетеродинного излучения:

$$\kappa = \frac{2J_1 \left(\frac{\pi D_{\text{пр}} \cdot \sin \gamma}{\lambda} \right)}{\frac{\pi \cdot D_{\text{пр}} \cdot \sin \gamma}{\lambda}}. \quad /11/$$

где $D_{\text{пр}}$ - диаметр фотодатчика, γ - угол рассогласования, J_1 - функция Бесселя первого порядка. $\kappa = 1$ при

$$\frac{\pi D_{\text{пр}} \cdot \sin \gamma}{\lambda} \leq 0,1; \quad /12/$$

б. При коллинеарности смешивания лучей, но в случае гауссовского распределения интенсивности на фотодатчике,

$$P_{c,г} = P_{0 \text{ c,г}} \cdot \exp \left(-\pi \frac{v^2}{d_{c,г}^2} \right). \quad /13/$$

где d_c, d_r - эффективные диаметры световых пятен сигнала и гетеродинного излучения в фокусе линзы:

$$\kappa = \frac{4\theta^2}{(1+\theta^2)^2} \cdot \frac{[1 - \exp(-\frac{\pi}{8} \cdot \xi^2 \frac{1+\theta^2}{\theta^2})]^2}{[1 - \exp(-\frac{\pi}{4} \xi^2)][1 - \exp(-\frac{\pi}{4} \frac{\xi^2}{\theta^2})]}. \quad /14/$$

где $\theta = \frac{d_c}{d_r}$; $\xi = \frac{D_{\text{пр}}}{d_c}$. При $\theta = 1, \xi > 1, \kappa = 1$.

в. При одновременном существовании неколлинеарности лучей и гауссовском распределении интенсивности имеем

$$\kappa = \frac{4\theta^2}{1+\theta^2} \cdot \exp \left[-4\pi \left(\frac{d_c \sin \gamma}{\lambda} \right) \frac{\theta}{1+\theta^2} \right], \quad /15/$$

где принято условие $D_{\text{пр}} \gg d_c, d_r$.

При ограничениях $d_c \sin \gamma / \lambda \leq 1, \theta = 1$ имеем $\kappa = 1$.

$$d_c \cdot \sin \gamma / \lambda \leq 0,05. \quad /16/$$

Из этого рассмотрения видно, что фокусирующие системы для сигнального и гетеродинного излучений должны быть идентичны; диаметр фотоприемника должен быть больше, чем эффективные диаметры сигнального и гетеродинного излучений.

Определим допустимые смещения оптических элементов в схеме приемника.

Возможное угловое рассогласование следует из /16/:

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{1}{20} \frac{\lambda}{d_c} \right). \quad /17/$$

Используя значение диаметра пятна Эри $d = 2 \frac{F\lambda}{D}$, из /17/ можно получить значение возможного линейного перемещения оптических элементов друг относительно друга:

$$\Delta x = \frac{1}{40} \frac{D}{F}, \quad /18/$$

где D - диаметр входного окна; F - фокусное расстояние линзы.

Рассмотрим зависимость чувствительности гетеродинного приемника от поляризации и когерентности сигнального и гетеродинного излучений /5/. В общем случае отношение сигнала к шуму S/N имеет вид

$$S/N = \eta \frac{P_c}{h\nu \Delta f} \cdot V \cdot B, \quad /19/$$

где V - коэффициент, учитывающий степень поляризации сигнального и гетеродинного излучений; B - коэффициент, учитывающий когерентность оптических полей сигнала и гетеродина.

Коэффициент V имеет вид

$$V = \frac{1 + K_1 K_2 \cos 2\psi}{(1 + K_1)(1 + K_2)} \quad /20/$$

где K_1, K_2 - степени поляризации сигнала и гетеродина.

Величина ψ есть угол между векторами поляризации сигнала и гетеродинного излучения. Пределы изменения V лежат между 0-1.

Коэффициент, учитывающий когерентность оптических полей сигнала и гетеродина, имеет вид

$$B = \frac{4A_{ом}^2}{D_{пр}^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{D_{пр}}{2A_{ом}}\right) \right]^n \cdot \sum_{p=0}^n \frac{1}{p!} \left(\frac{D_{пр}}{2A_{ом}}\right)^p \quad /21/$$

где

$$A_{ом} = \frac{2A_{01} \cdot A_{02}}{A_{01} + A_{02}};$$

A_{01}, A_{02} - площади когерентности сигнального и гетеродинного излучений.

Площадь когерентности определяется как степень сфазированности колебаний в плоскости падения волны. Она определяется через корреляционную функцию сигнала

$$R(r) = P \cdot \exp\left[-\left(\frac{r^2}{4\delta r_1^2}\right)\right] \quad /22/$$

Из условия

$$\frac{R(r)}{R(0)} > e^{-1} \quad /23/$$

определяют δr и, соответственно, площадь когерентности $A = \pi\delta r^2$.

При условии $A_{ом} \gg D_{пр}$.

$$B \approx 1. \quad /24/$$

Из приведенного рассмотрения видно, что сигнальная волна и гетеродинные волны должны быть полностью поляризованы; площади когерентности сигнала и гетеродина должны быть значительно больше площади фотодатчика.

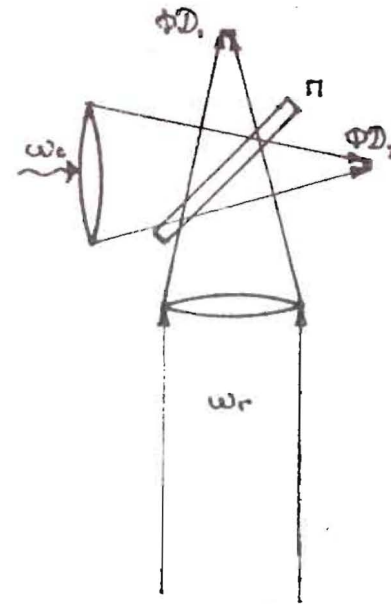


Рис. 1

Рассмотрим ограничения на допустимую модуляцию мощности лазера и вычислим его оптимальную мощность.

Ограничение на мощность гетеродина имеет вид

$$P_{г} = \frac{P_{пор}^*{}^2}{0.1 \alpha h\nu \Delta f} \quad /25/$$

где α принимает значения 1 - для фотодиодов и 2 - для фоторезисторов. Ограничение для модуляционных шумов гетеродина можно вычислить из условия^{15/}:

$$\langle i_M^2 \rangle \ll \langle i_c^2 \rangle$$

$$\text{или } P_M \ll 2\sqrt{P_c P_g}$$

Используя формулу /26/, можно получить

$$P_M \ll \frac{P_{пор}^*}{\sqrt{0.12 \eta}} \quad /26/$$

Для расчета примем $P_M = 10^{-2} P_{пор}^*$. Тем самым для выбранного фотоприемника $P_{г} = 10^{-5}$ Вт, $P_M = 10^{-11}$ Вт.

Как видно из вышеприведенных данных, требования на модуляционную мощность гетеродина весьма жесткие. Удовлетворить их можно, используя балансную схему гетеродинного приемника /приложение 1, рис.1/.

ОБЩАЯ СХЕМА ГЕТЕРОДИННОГО ПРИЕМНИКА

Эта схема изображена на рис.2. Сигнальное излучение подается на дифракционную решетку типа решетки эшелетт под определенным углом /приложение 2/, что позволяет развести отраженный поток на два направления. Эти потоки подаются на плоскопараллельные прозрачные пластины П1 и П2, где совмещаются с гетеродинным лазерным излучением и попадают на фотодетекторы ФД1 и ФД2. Сдвиг фазы сигнальной волны относительно гетеродинной волны осуществляется использованием пластинок различной толщины П1 и П2 при условии, что они изготовлены из одного и того же материала либо из материалов с различными показателями преломления. В дальнейшем регистрация и детектирование осуществляются по гетеродинной схеме приема.

Предложенный здесь приемник обладает большой избирательностью и высокой чувствительностью.

В заключение хотим выразить благодарность А.Ф.Писареву, Ю.А.Плису и А.А.Сазонову за помощь в работе и полезные обсуждения.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Рассмотрим принцип работы балансной схемы гетеродинного оптического приемника /рис.1/. Сигнальное и гетеродинное излучения подаются на плоскопараллельную пластинку П. В результате отражения и преломления образуются 2 потока, которые подаются на фотодатчики ФД1 и ФД2. Толщина П подбирается такой, чтобы существовал фазовый сдвиг между сигнальным и гетеродинным излучениями, равный $\pi/4$. Токи от ФД1 и ФД2 имеют вид

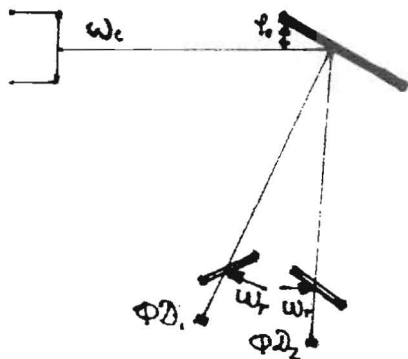


Рис.2

$$i_1 \sim A [E_c \cos(\omega_c t - \frac{\pi}{4}) + E_r \cos \omega_r t]^2 \quad /a/$$

$$i_2 \sim A [E_c \cos(\omega_c t - \frac{\pi}{4}) + E_c \cos \omega_c t]^2$$

Найдем $I_1 = i_1 + i_2$ и $I_2 = i_1 - i_2$;

$$I_1 \sim 2A^2 (E_c^2 + E_r^2) + 4A^2 E_c E_r \cos \Delta\omega t \quad /б/$$

$$I_2 \sim 4A^2 E_c E_r \sin \Delta\omega t$$

Видно, что I_2 не содержит членов, пропорциональных мощности гетеродина, следовательно, исключается влияние модуляционных шумов гетеродинного лазера. Отношение S/N остается таким же, как и у гетеродинного приемника одноплечевого типа.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Определим угол падения луча на дифракционную решетку эшелетт, при котором отраженный луч распространялся бы в 2 симметричных направления /рис.3/.

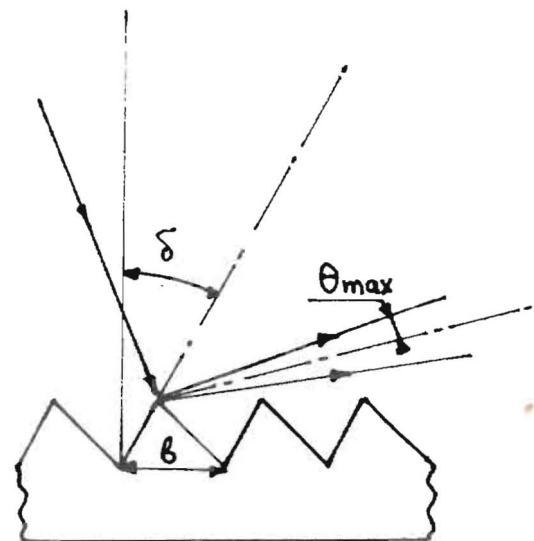


Рис.3

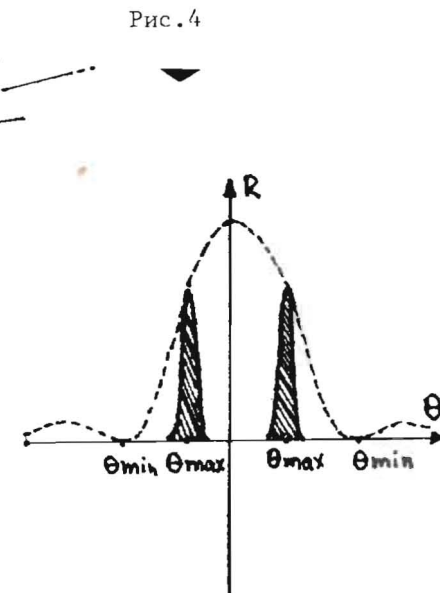


Рис.4

Распределение интенсивности отраженного света от решетки типа эшелетт описывается выражением /7/

$$I = I_0 \cos(\delta + \phi) \cdot \frac{\sin^2 [\pi b/\lambda \cos(\delta + \phi) \cdot \sin \theta]}{\pi^2 [b/\lambda \cos(\delta + \phi) \sin \theta]^2} \cdot \frac{\sin^2 \{ N \pi b/\lambda [\sin(\delta - \phi) + \sin(\delta + \phi + \theta)] \}}{\sin^2 \{ \pi b/\lambda [\sin(\delta - \phi) + \sin(\delta + \phi + \theta)] \}} \quad /a/$$

где N - количество штрихов, λ - длина волны излучения, ϕ , θ , b - углы и параметры решетки /даны на рис.3/.

Определим из /а/ углы максимумов и минимумов в отраженном свете. На рис.1 дано их расположение, где θ_{\min} от первого множителя формулы /а/, а θ_{\max} от второго. Они записываются в виде

$$\theta_{\min} = \arcsin \left(\frac{b}{\lambda} \frac{1}{\cos(\delta + \phi)} \right); \quad \theta_{\max} = 2\delta \quad /б/$$

Условие, при котором отраженное излучение распространяется в два равных по интенсивности максимума, имеет вид

$$\frac{\lambda}{b} = \sin 4\delta. \quad /в/$$

Определим коэффициент потерь сигнала на отражение. В нашем случае он находится из формулы

$$r = 1 - 2R, \quad /г/$$

где R - коэффициент отражения в один из максимумов. Он выводится подстановкой в /а/ выражения для θ_{\max} из /б/:

$$R = \frac{\sin \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\cos(\delta + \phi)}{\cos 2\delta} \right]}{\cos^2(\delta + \phi) / \cos 2\delta} \cdot \frac{4}{\pi^2}.$$

Например, при $\delta = 1^\circ$, $\phi = 43^\circ$, $R = 0,46$ из /г/ получим $\Gamma = 0,08$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Определим параметры смешивания двух оптических полей на плоскопараллельной пластинке /рис.5/.

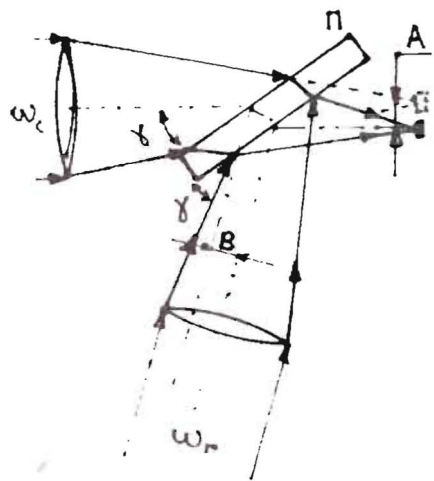


Рис. 5

Для уменьшения потерь сигнала на отражение его подают на пластинку P под углом Брюстера, который находят из выражения

$$\phi_{\text{Бр}} = \arctg \frac{n_2}{n_1}. \quad /а/$$

где n_2, n_1 - коэффициенты преломления для вещества пластинки и воздуха.

Полное прохождение сигнальной волны через пластинку возможно, если направление вектора напряженности E_c перпендикулярно плоскости падения. При осуществлении смешения сигнального и гетеродинных оптических полей под углом $\pi - 2\phi_{\text{Бр}}$ /рис.5/ на фотодетектор попадут излучения с перпендикулярными поляризациями. Как видно из /20/, гетеродинный эффект исчезает.

Для преодоления этой трудности предлагается смешивать волновые поля под несколько отличным от $\pi - 2\phi_{\text{Бр}}$ углом. При смешивании под углом $\pi - 2\phi_{\text{Бр}} + \alpha$, где α - малый угол, коэффициент прохождения сигнальной волны Γ равен

$$T = \frac{n_2}{n_1} \operatorname{ctg}(\phi_{\text{Бр}} + \alpha) = \frac{1 - \alpha \frac{n_2}{n_1}}{1 + \alpha \frac{n_1}{n_2}}.$$

При $\alpha = 3^\circ$, $n_2 = 1,5$, $n_1 = 1$, $T = 0,89$. Коэффициент отражения для гетеродинного излучения равен $R = 1 - \Gamma = 0,11$.

Параметры геометрического смещения A и B /см. рис.4/:

$$A = D_{\text{пл}} \cdot \frac{\cos 2\phi'_{\text{Бр}}}{\sin \phi'_{\text{Бр}}}, \quad B = D_{\text{пл}} / \sin \phi'_{\text{Бр}}, \quad /б/$$

где $D_{\text{пл}}$ - толщина пластинки; $\phi'_{\text{Бр}} = \phi_{\text{Бр}} - \alpha$, $\gamma = \frac{\pi}{2} - \phi_{\text{Бр}} + \alpha$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вакару С. Многофотон-гравитационные процессы и параметрическое усиление в газообразных средах. Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. ОИЯИ, Дубна, 1983, с.60.
2. Вакару С., Писарев А.Ф. Параметрическое усиление на основе многоволновых процессов при многофотон-гравитационном резонансе. Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. ОИЯИ, Дубна, 1983, с.75.
3. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. "Машиностроение", Л., 1983, с.453.
4. Радиотехника и электроника, 1972, т.17, № 1, с.103.
5. Journ. of Electronics and Control First Series, 1964, vol.16, No.6, p.687.
6. Радиотехника и электроника, 1971, т.16, № 3, с.373.
7. Королев Ф.А. Теоретическая оптика. "Высшая школа", М., 1966, с.464.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 мая 1985 года.