

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 2 — 1972

УДК 538.56:530.145

М. И. ЗУСМАН, Н. К. МАНЕШИН, В. Н. ПАРЫГИН

МОДУЛЯЦИЯ 10 мкм ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА

Приведены результаты экспериментального исследования модулятора 10,6 мкм излучения, использующего фотоупругий эффект в кристалле германия. Получена эффективность модуляции при частоте ультразвука 13 мГц, равная 20% на двулучепреломлении и 70% на дифракции при потреблении пьезовозбудителем электрической мощности 2,2 Вт. Полоса модуляции составляла 1%.

В инфракрасном диапазоне для целей модуляции может найти широкое применение явление фотоупругости. Это связано с тем, что фотоупругий эффект наблюдается во всех кристаллах и даже в изотропных средах. Широкий класс возможных материалов позволяет выбрать кристаллы, обладающие большим показателем преломления ($n \simeq 4 \div 6$), причем эффективность модуляции должна быть пропорциональна n^6 . Указанное обстоятельство дает возможность создавать эффективные фотоупругие модуляторы света в инфракрасном диапазоне.

Обычно модуляция осуществляется на собственных частотах кристалла, при этом деформации резко возрастают, чем достигается значительный выигрыш по модулирующей мощности. В этом случае полоса частот, в которой возможна модуляция, резко сужается. Поэтому такие модуляторы могут найти применение в узкополосных системах, например, светодальномерах, для измерений частотных характеристик фотоприемников и т. д.

В настоящем сообщении приводятся результаты экспериментального исследования модулятора 10,6 мкм излучения, использующего фотоупругий эффект в кристалле Ge, имеющем показатель преломления $n=4$.

При создании в кристалле Ge упругой деформации u вдоль оси [111] последний из изотропного превращается в одноосный кристалл с оптической осью, направленной по [111]. При этом показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей принимают вид

$$\begin{aligned} n'_0 &= n + \frac{n^3}{6} (p_{11} + 2p_{12} - p_{44}) u, \\ n'_l &= n + \frac{n^3}{6} (p_{11} + 2p_{12} + 2p_{44}) u, \end{aligned} \quad (1)$$

где n — показатель преломления при отсутствии деформации, а p_{11} , p_{12} , p_{44} — упругооптические коэффициенты. На основе фотоупругого эффекта могут быть созданы два типа модуляторов света — двулучепреломляющий и дифракционный [1, 2].

При использовании двулучепреломления интенсивность света на выходе модулятора определяется выражением

$$I = \frac{I_0}{2} \left\{ 1 - J_0^2\left(\frac{\Gamma_1}{2}\right) + 2J_1^2\left(\frac{\Gamma_1}{2}\right) \cos 2\Omega t - 2J_2^2\left(\frac{\Gamma_1}{2}\right) \cos 4\Omega t + \dots \right\}, \quad (2)$$

где

$$\Gamma_1 = \frac{2\pi}{\lambda} l (n'_i - n'_o) = \frac{\pi}{\lambda} \ln^3 p_{44} u,$$

l — длина взаимодействия света и звука. На выходе дифракционного модулятора свет представляет собой совокупность дифракционных максимумов, симметрично расположенных относительно центрального максимума. Интенсивность света в нулевом дифракционном максимуме равна

$$I = I_0 \left\{ J_0^4\left(\frac{\Gamma_2}{2}\right) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_k^4\left(\frac{\Gamma_2}{2}\right) - \left[4 \sum_{k=0}^{\infty} J_k^2\left(\frac{\Gamma_2}{2}\right) J_{k+1}\left(\frac{\Gamma_2}{2}\right) \right] \cos 2\Omega t + \dots \right\}, \quad (3)$$

где

$$\Gamma_2 = \frac{2\pi}{\lambda} l (n' - n).$$

Из (1) и (3) следует, что дифракция в кристалле Ge для необыкновенного луча будет больше, чем для обыкновенного. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать дифракцию только необыкновенного луча.

В двулучепреломляющем модуляторе дифракция света также имеет место. Выражение (2) для интенсивности света на выходе двулучепреломляющего модулятора получено в предположении, что все дифракционные максимумы попадают на вход фотоприемника. На достаточно высоких частотах модуляции, когда углы дифракции становятся значительными, в модуляторе на двулучепреломлении приходится прибегать к помощи собирающей линзы, которая сводит все дифракционные максимумы на вход фотоприемника.

Как следует из (2) и (3), интенсивность света на выходе обоих типов модуляторов оказывается модулированной четными гармониками частоты ультразвука Ω . При малых величинах Γ имеет место модуляция только с частотой 2Ω , при больших Γ — и гармониками с частотой 4Ω и т. д. Об относительной интенсивности света на частоте 2Ω можно судить по изменению постоянной составляющей ΔI_{\equiv} на выходе модулятора. Измерение последней значительно проще по сравнению с измерением переменной составляющей. В дальнейшем под эффективностью модулятора будем понимать величину $\eta = \frac{\Delta I_{\equiv}}{I_0}$.

Экспериментально исследованы оба типа модуляторов на фотоупругости. При исследовании модулятора на двулучепреломлении в качестве поляроида использовались две пластинки из Ge, расположенные под углом Брюстера. С помощью такого поляроида удавалось достигать соотношения между ортогональными поляризациями света 1:100.

Возбуждение продольных ультразвуковых волн вдоль оси [111] в кристалле Ge осуществлялось с помощью кварцевых пластинок X-сре-

за и пластинок из титаната бария, которые вакуумной смазкой приклеивались к грани кристалла. Тонкий слой вакуумной смазки обеспечивал акустический контакт между пьезопреобразователем и германием.

На рис. 1 приведена эквивалентная схема пьезопреобразователя, где R_s — сопротивление излучения преобразователя, определяемое соотношением $P = \frac{v^2}{R_s}$. Здесь v — напряжение на преобразователе,

P — мощность, потребляемая пьезопреобразователем от генератора электрических колебаний.

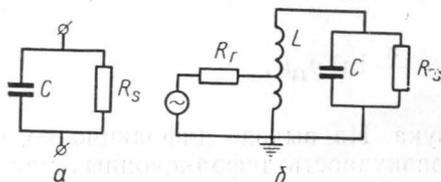


Рис. 1. а — эквивалентная схема пьезопреобразователя, б — принципиальная схема согласования пьезопреобразователя с генератором электрических колебаний

Для повышения эффективности модуляции необходимо увеличивать мощность, отбираемую преобразователем от генератора электрических колебаний. Это достигается согласованием сопротивления излучения преобразователя R_s с внутренним сопротивлением генератора R_g . В качестве согласующего элемента использовался трансформирующий контур (см. рис. 1, б).

Индуктивность L служила для компенсации емкостной реактивности преобразователя C , а изменением степени включения преобразователя в контур согласовывалась активная составляющая R_s с сопротивлением генератора R_g .

Для оценки величины мощности, потребляемой преобразователем, необходимо знать сопротивление излучения R_s . Последнее находилось методом эквивалентного замещения преобразователя активным сопротивлением R_s и емкостью C , образующей с индуктивностью L резонансный контур на частоте возбуждения пьезопреобразователя.

Представляет определенный интерес исследование преимуществ того или иного типа преобразователя (кварцевого или из титаната бария) для возбуждения ультразвука в модулирующем кристалле Ge. С этой целью была измерена эффективность модуляции (на двулучепреломлении) при возбуждении одного и того же образца Ge преобразователем из кварца и титаната бария, причем собственные частоты $f_{эфф} \approx 1$ мГц) и геометрические размеры (площади) преобразователей были одинаковы.

Измерение параметров преобразователей дало следующие значения: для кварцевой пластинки $C=8$ пф, $R_s=460$ ом, для преобразователя из титана бария $C=980$ пф, $R_s=450$ ом. Эквивалентные добротности преобразователей $Q \equiv \omega CR_s$ соответственно получились $Q_{кв}=113$, $Q_{т.б}=3,5$. Была получена эффективность модуляции с преобразователем из кварца $\eta=10\%$, с преобразователем из титаната бария $\eta=20\%$. Мощности, отбираемые пьезопреобразователями от генератора электрических колебаний, равнялись при этом 4 и 9 вт. Разницу в величинах мощностей можно объяснить, если учесть конечную добротность Q_k согласующего контура ($Q_k=100$). В случае кварцевого преобразователя Q_k была приблизительно равна добротности преобразователя $Q_{кв}$. Поэтому половина мощности, которую отдавал генератор, терялась в согласующем контуре. В случае преобразователя из титаната бария Q_k во много раз превосходила $Q_{т.б}$, что позволило подать на преобразователь всю мощность генератора.

Сравнивая эффективности модуляции и мощности, потребляемые преобразователями, нетрудно заметить, что при одинаковых мощностях

эффективность модулятора с пьезопреобразователем из кварца и из титаната бария оказалась практически одинаковой.

С повышением частоты ультразвука начинает проявляться преимущество кварцевого преобразователя, так как емкость преобразователя из титаната бария принимает настолько большие значения, что становится практически трудно создать удовлетворительный согласующий контур.

Экспериментально исследовалась зависимость эффективности обоих типов модуляторов от мощности, потребляемой преобразователем. Сравнение этих зависимостей позволило определить соотношение между эффективными упругооптическими коэффициентами, величины которых для Ge неизвестны.

Действительно, как видно из выражений (1), (2) и (3), эффективность модулятора на двулучепреломлении определяется упругоопти-

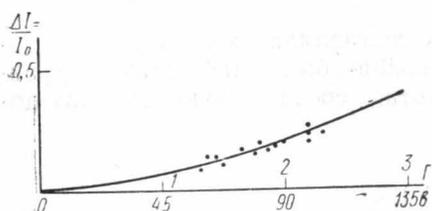


Рис. 2. Теоретическая и экспериментальная зависимости эффективности модулятора на двулучепреломлении от величины напряжения, подаваемого на пьезопреобразователь

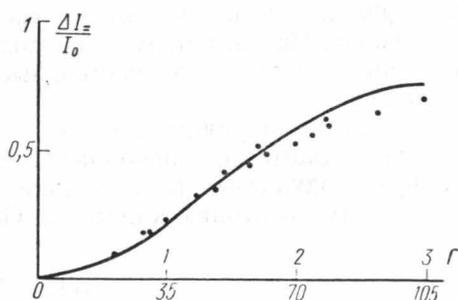


Рис. 3. Теоретическая и экспериментальная зависимости эффективности дифракционного модулятора от величины напряжения, подаваемого на пьезопреобразователь

ческим коэффициентом $3p_{44}$, в то время как эффективность дифракционного модулятора — эффективным упругооптическим коэффициентом $(p_{11} + 2p_{12} + 2p_{44})$. На рис. 2 представлена эффективность модуляции η на двулучепреломлении от величины Γ и экспериментальная зависимость η от напряжения, подаваемого на пьезопреобразователь. На рис. 3 — аналогичные зависимости для дифракционного модулятора.

Коэффициенты пропорциональности между величиной фазовой задержки Γ и напряжением v для каждого типа модулятора выбирались из условия наилучшего совпадения теоретических и экспериментальных кривых. Так как в обоих типах модуляторов использовался один и тот же кристалл германия и возбуждение ультразвука осуществлялось одним и тем же пьезопреобразователем, то отношение этих коэффициентов равно $\frac{3p_{44}}{p_{11} + 2p_{12} + 2p_{44}}$. Величина этого отношения из эксперимента оказалась равной 0,77.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при одинаковых упругих деформациях u в кристалле Ge эффективность модулятора на дифракции получается выше, чем на двулучепреломлении. Это объясняется, во-первых, тем, что зависимость $\eta(\Gamma)$ при дифракции более сильная, чем $\eta(\Gamma)$ при двулучепреломлении, и, во-вторых, тем, что эффективный упругооптический коэффициент германия $(p_{11} + 2p_{12} + 2p_{44})$ превосходит коэффициент $3p_{44}$.

Дополнительным преимуществом дифракционного модулятора является также отсутствие анализатора, а следовательно, меньшие потери излучения.

Экспериментально были получены следующие значения максимальной эффективности модуляции при частоте ультразвука 5 мгц $\eta=45\%$ на двулучепреломлении и $\eta=75\%$ на дифракции при потреблении пьезопреобразователями мощности 8 вт; при частоте ультразвука 13 мгц $\eta=20\%$ на двулучепреломлении и $\eta=70\%$ на дифракции при электрической мощности возбуждения 2,2 вт.

Отличие в эффективностях модуляции на этих частотах объясняется тем, что в первом случае использовался пьезопреобразователь и кристалл Ge с большей длиной l по свету ($l=29$ мм на $f=5$ мгц и $l=14$ мм на $f=13$ мгц). Большой размер l повышает добротность акустического резонатора (кристалла Ge), а следовательно, увеличивает интенсивность упругих деформаций в Ge. Необходимо учитывать, что в дифракционном модуляторе имеется ограничение на частоту модуляции снизу. Частота модуляции должна быть достаточно высокой, чтобы нулевой и первый дифракционные максимумы пространственно разделились.

Полоса модуляции во всех случаях составляла около 1%, но с помощью одного пьезопреобразователя можно было наблюдать эффективную модуляцию на нескольких частотах, соответствующих последовательным оборотам кристалла Ge.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. «Наука», 1970.
2. Манешин Н. К., Мустель Е. Р., Парыгин В. Н., Соломатин В. С. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 5, 1967.

Поступила в редакцию
25.1 1971 г.

Кафедра
физики колебаний