

ФОТОУПРУГИЕ МОДУЛЯТОРЫ СВЕТА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ И ФОСФИДА ГАЛЛИЯ

С. А. Гейдур, К. И. Крылов, В. Т. Прокопенко и А. Д. Яськов

Приведены результаты исследований и основные технические характеристики фотоупругих модуляторов на основе кристаллов GaAs и GaP. Разработанные модуляторы обеспечивают эффективную высокочастотную модуляцию световых потоков со значительными углами апертур в широком спектральном интервале и при малых управляющих напряжениях.

В данной работе рассматриваются характерные особенности и важнейшие характеристики фотоупругих модуляторов света на основе кристаллов GaAs и GaP (класс $43m$), работающих с узкими световыми пучками (при $D \ll \Lambda$, где D — линейная апертура светового пучка, а Λ — длина звуковой волны) и предназначенных для работы с полупроводниковыми излучателями в составе оптоэлектронных систем. Фосфид галлия, арсенид галлия, а также их твердые растворы ($\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$) в настоящее время являются важнейшими материалами для твердотельной оптоэлектроники. Выполненные нами ранее исследования пьезооптических свойств GaAs и GaP [1, 2], а также $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ [3] показали, что эти вещества имеют высокую акустооптическую эффективность и принципиально пригодны для создания фотоупругих модуляторов света.

Для изготовления активных элементов фотоупругих модуляторов были использованы слаболегированные, как правило, высокоомные кристаллы арсенида и фосфида галлия с удельным сопротивлением до $\rho \approx 10^6$ Ом·см, выращенные из расплава методом Чохральского или методом бестигельной зонной плавки. Для исследований отбирались наиболее однородные кристаллы (как правило это были специально вырезанные однородные части объемных кристаллов), для которых вариация коэффициента преломления по объему, оцененная аналогично [4] вблизи края собственного поглощения не превышала $\delta n \leq 0.001$.

Оптическая обработка кристаллов GaAs и GaP производилась по обычной технологии, применяемой при обработке полупроводников. Окончательные геометрические размеры активных элементов фотоупругих модуляторов, изготовленных из GaAs или GaP, составляли от $0.7 \times 0.7 \times 1.4$ мм до $5 \times 5 \times 11.2$ мм. Стоячие волны механических напряжений $\sigma = \sigma_m \cos kl \cos \Omega t$ (где Ω — частота, а $k = \Omega/v$ — волновой вектор ультразвуковой волны) в активных элементах возбуждались с помощью стандартных пьезоэлектрических преобразователей на основе керамики ЦТС-19. Основная резонансная частота применявшихся преобразователей составляла $F_0 = 2.39$ МГц, ширина полосы частот $\Delta F = 1.35$ МГц.

Исследование основных характеристик и параметров изготовленных модуляторов света производилось по методике и программе в целом аналогичным [5-9]. Для рассматриваемых условий экспериментов, когда световой пучок проходит через центр пучности ультразвуковой волны, а его поперечный размер D мал по сравнению с длиной полуволны звука ($\Lambda/2$), максимальная мгновенная интенсивность света на выходе анализатора, может быть представлена также, как и при статическом давлении, выражением

$$I_m = \frac{1}{2} I_0 (1 - \cos \Gamma), \quad (1)$$

где Γ — разность фаз для главных компонент поляризации излучения. Исследования фотоупругой модуляции в GaP и GaAs были выполнены в двух геометриях экспериментов при $k \parallel [111]$ и $k \parallel [110]$. Для них соответственно $\Gamma = -(\pi d/\lambda) n^3 \pi_{44} \sigma + \Gamma_0$ и $\Gamma = (\pi d/\lambda) (n^3/3) [(\pi_{11} - \pi_{12}) + 2\pi_{44}] \sigma + \Gamma_0$, где Γ_0 — начальная разность фаз в излучении, падающем на кристалл, а остальные обозначения аналогичны [1].

Сравнивая (1) с выражением для максимальной мгновенной интенсивности света на выходе фотоупругого модулятора, работающего с широкими световыми пучками (см., например, выражение (7) работы [5]), где $D \gg \Lambda$, нетрудно убедиться, что эффективность модуляции света, определяемая крутизной зависимости $I_m/I_0 = f(\Gamma)$, в рассматриваемом случае при $D \ll \Lambda$ оказывается принципиально более высокой.

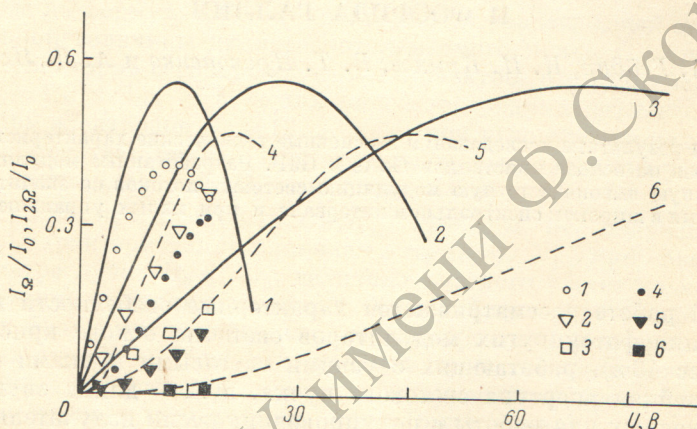


Рис. 1. Зависимость интенсивности промодулированного на основной ($1-3$) и удвоенной ($4-6$) частоте светового сигнала от напряжения на преобразователе.

Сплошными и штриховыми линиями показаны результаты расчетов по формуле (2) соответственно для $\Gamma_0 = \pi/2$ и $\Gamma_0 = 0$. Экспериментальные данные обозначены значками: $1, 4$ — GaP, $\lambda = 0.63$ мкм; $2, 5$ — GaP, GaAs, $\lambda = 1.15$ мкм; $3, 6$ — стекло К8, $\lambda = 0.63$ мкм. Толщина образцов $d = 3$ мм.

Временная зависимость интенсивности выходного излучения может быть получена разложением (1) в ряд Фурье

$$I = \frac{1}{2} I_0 \{ 1 - \cos \Gamma_0 [J_0(\Gamma^*) - 2J_2(\Gamma^*) \cos 2\Omega t + 2J_4(\Gamma^*) \cos 4\Omega t - \dots] + \sin \Gamma_0 [2J_1(\Gamma^*) \cos \Omega t - 2J_3(\Gamma^*) \cos 3\Omega t + 2J_5(\Gamma^*) \cos 5\Omega t - \dots] \}, \quad (2)$$

где J_n — функция Бесселя n -го порядка, а Γ^* — амплитуда временной зависимости разности фаз в излучении, проходящем через пучность ультразвуковой волны. Из (2) видно, что спектральный состав светового сигнала на выходе анализатора прямо определяется состоянием поляризации света, падающего на активный фотоупругий элемент. Так для линейно поляризованного излучения ($\Gamma_0 = 0$) в спектре выходного сигнала содержатся только четные гармоники с частотами $2m\Omega$ ($m = 1, 2, \dots$), а для циркулярно-поляризованного излучения ($\Gamma_0 = \pi/2$) — только нечетные с частотами $(2m+1)\Omega$ ($m = 0, 1, 2, \dots$).

Данные расчетов по (2) и экспериментов по измерению зависимостей интенсивности излучения на выходе фотоупругих GaAs и GaP — модуляторов от величины управляющего напряжения на пьезообразователе представлены на рис. 1, где для сравнения показаны также результаты по исследованию фотоупругой модуляции в оптическом стекле К8. Из анализа данных рис. 1 и соотношений (1), (2) нетрудно определить $\Gamma_{\text{GaP}}^* |_{\lambda=0.63 \text{ мкм}} = 2.2 \Gamma_{\text{GaP}}^* |_{\lambda=1.15 \text{ мкм}} = 2.15 \Gamma_{\text{GaAs}}^* |_{\lambda=1.15 \text{ мкм}} = 5.8 \Gamma_{\text{K8}}^* |_{\lambda=0.63 \text{ мкм}}$ при заданном управляющем напряжении U . Эти соотношения прямо характеризуют эффективность фотоупругой модуляции света в исследованных материалах. Отметим, что приведенные соотно-

шения находятся в хорошем соответствии с данными по исследованию фотоупругого эффекта в GaAs и GaP при статической нагрузке [1].

Из рис. 1 видно, что имеется вполне удовлетворительное качественное совпадение расчетных и экспериментальных данных по амплитудным характеристикам I_{Ω}/I_0 и $I_{2\Omega}/I_0$. Вместе с тем экспериментальные величины интенсивностей первой и второй гармоник на выходе анализатора были систематически заниженными по сравнению с данными расчетов по (2). Такое расхождение в значительной мере обусловлено влиянием поперечных типов ультразвуковых колебаний, которые довольно четко наблюдались практически во всех экспериментах, в том числе и при использовании активных элементов специального профиля в направлении распространения ультразвуковой волны.

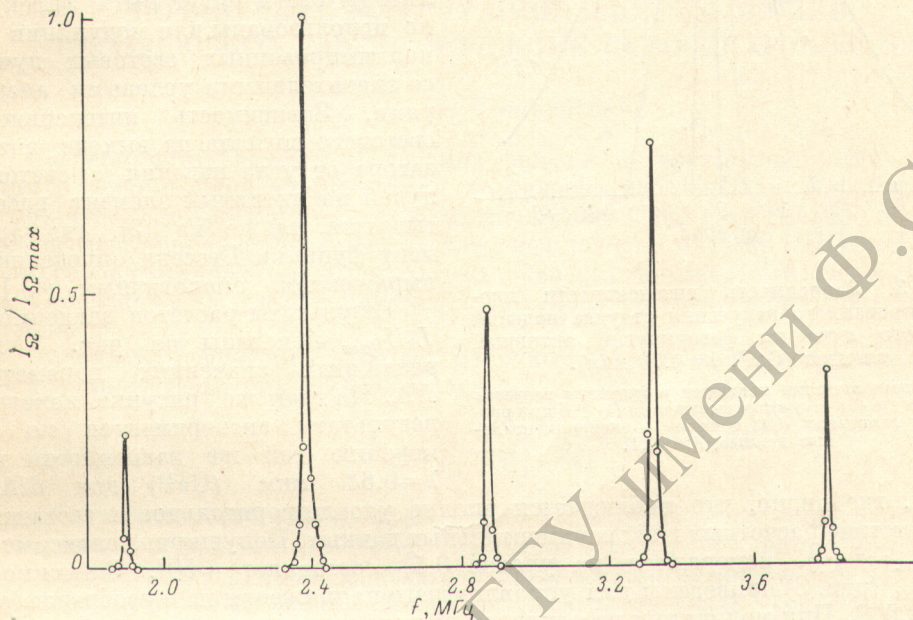


Рис. 2. Частотная характеристика фотоупругого модулятора на GaP ($\lambda=0.63$ мкм).

Существенной особенностью фотоупругой модуляции с удвоенной частотой 2Ω ($\Gamma=0$) является зависимость интенсивности постоянной составляющей I -светового сигнала на выходе модулятора от управляющего напряжения на преобразователе. Данные экспериментов по измерению зависимости I/I_0 от управляющего напряжения U находились в полном соответствии с результатами расчетов, выполненных по (2), $I_{-}=(1/2)I_0[1 - J_0(\Gamma^*)]$. В то же время при введении фазовой пластинки $\lambda/4$ между входным поляризатором и активным элементом так, что $\Gamma_0=\pi/2$, постоянная составляющая $I_{-}=(1/2)I_0$ независимо от напряжения на преобразователе.

Из данных расчетов (2) и экспериментов рис. 1 легко определить глубину модуляции света $m_{\Omega}=I_{\Omega}/I_{-} \simeq 2J_1(\Gamma^*)$, $m_{2\Omega}=I_{2\Omega}/I_0 \simeq 2J_2(\Gamma^*)/[1 - J_0(\Gamma^*)]$ для малых управляющих напряжений. Измеренные величины m_{Ω} и $m_{2\Omega}$ слабо зависели от длины волны излучения (при одном и том же Γ^*) и составляли для GaAs и GaP $m_{\Omega} \simeq 0.84$; $m_{2\Omega} \simeq 0.67$ при $\Gamma^*=1.84$.

Увеличение управляющего напряжения на преобразователе приводит к возрастанию высших гармоник в промодулированном световом сигнале. При модуляции на основной Ω или удвоенной 2Ω частоте акустической волны это приводит к искажению светового сигнала на выходе модулятора. В рабочей области управляющих напряжений использованного преобразователя ($U=0 \div 17.5$ В) искажения выходного сигнала обусловлены в основном вкладом составляющих с частотами 3Ω (при $\Gamma_0=\pi/2$) или 4Ω (при $\Gamma_0=0$). Для $\lambda=0.63$ мкм (GaP) уровень искажений составляет $I_{4\Omega}/I_{2\Omega} \simeq 2\%$ и $I_{3\Omega}/I_{\Omega} \simeq 5\%$ при $U=6$ В, а также $I_{4\Omega}/I_{2\Omega} \simeq 9\%$ и $I_{3\Omega}/I_{\Omega} \simeq 16\%$ при $U=12.5$ В.

Фотоупругий модулятор работает на собственных резонансных частотах в пределах полосы частот пьезоэлектрического преобразователя. В качестве примера на рис. 2 показана частотная характеристика фотоупругого модулятора на GaP ($k \parallel [111]$), измеренная при $\lambda=0.63$ мкм. Эффективная модуляция наблюдается на собственных ультразвуковых частотах $F=\Omega/2\pi=1.90, 2.39, 2.88, 3.33, 3.8$ МГц ($\Gamma=\pi/2$). Ширина резонансных пиков для исследованных нами модуляторов составляет $\Delta F \approx 20$ кГц. Эта величина ограничивает ширину полосы частот низкочастотного модулирующего сигнала.

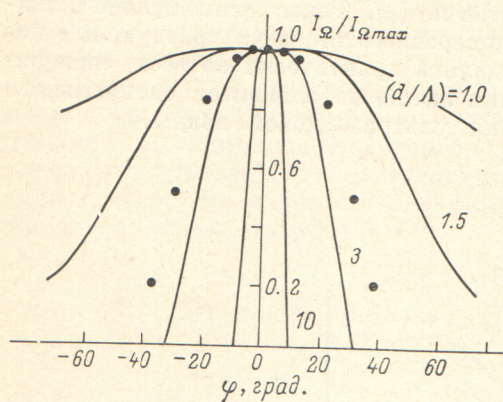


Рис. 3. Зависимость интенсивности промодулированного излучения от угла падения светового луча на фотоупругий активный элемент (GaP, $\lambda=0.63$ мкм).

Сплошными линиями показаны результаты расчетов по формуле (2) (с учетом выражения (4) [5]) при различных величинах d/Λ ; точками — экспериментальные данные, $d/\Lambda \approx 1.1$.

≈ 1.1 , где видно, что наблюдается вполне удовлетворительное качественное соответствие расчетных и экспериментальных данных. Полуширина зависимости $I_\Omega/I_{\Omega\max}=f(\varphi)$, измеренная на уровне 0.5, составляет $\sim 50^\circ$. Зависимости $I_\Omega/I_{\Omega\max}$ (рис. 3) приведены для управляющего напряжения на преобразователе $U=12.5$ В. При модуляции на основной частоте акустической волны Ω это значение U отвечает максимуму амплитудной характеристики рис. 1.

Предлагаемые фотоупругие модуляторы света могут быть эффективно использованы для модуляции неколлимированных световых пучков со значительными угловыми апертурами. Зависимость интенсивности светового сигнала на выходе анализатора от угла падения φ световых лучей на активный элемент рассчитывается также из (2), где аргумент функции Бесселя определяется выражением, аналогичным (4) [5].

Результаты расчетов зависимости $I_\Omega/I_{\Omega\max}$ показаны на рис. 3 при различных значениях параметров d/Λ . На этом же рисунке показаны результаты экспериментов по измерению той же зависимости при $\lambda=0.63$ мкм (GaP) для $d/\Lambda \approx$

Л и т е р а т у р а

- [1] С. А. Гейдур, А. Н. Пихтин, В. Т. Прокопенко, А. Д. Яськов. *Опт. и спектр.*, 46, 714, 1979.
- [2] С. А. Гейдур, В. Т. Прокопенко, А. Д. Яськов. *ФТП*, 14, 178, 1980.
- [3] С. А. Гейдур, А. Н. Пихтин, А. Д. Яськов. *Опт. и спектр.*, 43, 944, 1980.
- [4] В. Т. Прокопенко, А. Д. Яськов. *Письма ЖТФ*, 4, 7, 1978.
- [5] И. И. Адрианова. *Опт. и спектр.*, 14, 137, 1963.
- [6] Н. К. Манешин, Е. Р. Мустель, В. Н. Парыгин, В. С. Соломатин. *Вестн. МГУ*, № 5, 110, 1967.
- [7] J. C. Kemp. *J. Opt. Soc. Am.*, 59, 950, 1969.
- [8] I. Chabay, G. Holzwarth. *Appl. Opt.*, 14, 454, 1975.
- [9] K. W. Hürps, G. A. Grosby. *J. Phys. Chem.*, 83, 555, 1979.

Поступило в Редакцию 13 октября 1980 г.