

06.2

© 1992

О ПРЕДЕЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОРЕЗИСТОРА
В РЕЖИМЕ ФАЗОВОГО ДЕТЕКТОРАМ.В. Долгов, А.И. Князев, М.В. Свиридов,
В. Шарф, Ю.И. Швец

Одной из важнейших задач современной оптоэлектроники и техники оптической связи является проблема фазовой демодуляции светового излучения. Основная трудность заключается в известном свойстве обычных фотоприемников реагировать только на интенсивность света. При этом вся информация о фазовой модуляции сигнала полностью пропадает. В общем случае решение указанной задачи осуществляется системным образом или с помощью оптического гетеродирования, что заметно усложняет структуру и требования к соответствующим оптоэлектронным устройствам.

Однако для фазовой демодуляции оптических сигналов возможно применение спектрально-чувствительных фотоприемников, работающих в режиме регистрации излучения, энергия фотонов которого несколько меньше ширины запрещенной зоны [1]. В этом случае за счет существования размытия краев зоны появляется резкая зависимость чувствительности фотоприемника от частоты излучения. Известно, что выбором полупроводниковых материалов и их легированием можно достаточно точно подобрать ширину запрещенной зоны для заданной длины волны света. В частности, это относится и к окнам прозрачности современных оптических волокон [2]. С другой стороны, спектральная чувствительность фотоприемника позволяет осуществлять фазовую демодуляцию напрямую по принципу обычного частотного дискриминатора. Преимущества такого подхода представляются очевидными, если, конечно, возможна реализация требуемой чувствительности метода.

В настоящей работе рассматривается электродинамическая теория такого оптического фазового детектора и дается оценка его предельной чувствительности на основе соотношения Найквиста. Для примера взят фоторезистор на основе \overline{GaAs} в области 0.85 мкм и показана его перспективность для решения практических задач.

Фототок i , инициируемый в объеме V образца, имеет вид

$$i = k \int_V \tilde{Q} dV. \quad (1)$$

Здесь k — коэффициент пропорциональности, зависящий от квантовой эффективности и коэффициента внутреннего усиления, \tilde{Q} — поглощение энергии излучения в единице объема за единицу времени и волной обозначено усреднение по времени на интервалах длительностью порядка времени жизни носителей τ .

Пусть на чувствительную площадку фоторезистора падает плоская волна $E(t, \vec{r})$. Это поле и вызванную им поляризуемость среды $P(t, \vec{r})$ представим в виде преобразования Фурье:

$$E = \int \alpha(\omega, \vec{r}) e^{i\omega t} d\omega, \quad P = \int b(\omega, \vec{r}) e^{i\omega t} d\omega,$$

где $b(\omega) = \alpha(\omega) \alpha(\omega)$ и $\alpha(\omega)$ — комплексная восприимчивость вещества.

Для оценки возможностей фазовой демодуляции рассмотрим детектирование сигнала, световая частота которого равна ω_0 , а фаза меняется по гармоническому закону с частотой $\Omega \ll \frac{1}{T}$:

$$E = A \cos(\omega_0 t + \mu \sin \Omega t).$$

В случае, когда индекс модуляции $\mu \ll 1$, спектр поля с точностью до μ^2 имеет вид

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{4} A \left[2\delta(\omega - \omega_0) + 2\delta(\omega + \omega_0) - \mu\delta(\omega - \omega_0 + \Omega) - \mu\delta(\omega - \omega_0 - \Omega) + \mu\delta(\omega - \omega_0 + \Omega) + \mu\delta(\omega - \omega_0 - \Omega) \right].$$

Тогда, учитывая, что $Q = -E \frac{dP}{dt}$ и усредняя по времени, получим

$$\tilde{Q} = \int s(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (2)$$

$$s(\omega) = \frac{1}{4} \omega_0 A^2 \left[2\alpha''(\omega_0) \delta(\omega) + \mu\Omega \frac{d\alpha''}{d\omega} \delta(\omega - \Omega) + \mu\Omega \frac{d\alpha''}{d\omega} \delta(\omega + \Omega) \right]. \quad (3)$$

Здесь $\alpha'' = \text{Im} \alpha$ и производные взяты при $\omega = \omega_0$.

Полагая, что величина A^2 в нулевом приближении по μ удовлетворяет закону Бутера, из (1), (2) и (3) получим

$$i(t) \approx k \left(1 + \mu \frac{\Omega}{\gamma_0} \frac{d\gamma}{d\omega} \cos \Omega t \right) \delta S \left[1 - \exp(-\gamma_0 L) \right],$$

где S — площадь поверхности образца, L — его толщина $\gamma(\omega)$ — коэффициент поглощения среды на частоте ω , S — падающий поток излучения и $\gamma(\omega_0) = \gamma_0$.

Далее будем считать, что квантовая эффективность фотоприемника близка к единице и внутреннее усиление отсутствует. Тогда $k \approx \frac{e}{\hbar \omega}$ (e — заряд электрона) и при $\gamma_0 L \gg 1$ переменная (полезная) составляющая фототока i_c равна

$$i_c \approx \left(\frac{e}{\hbar\omega} \frac{\Omega}{\gamma_0} \frac{d\gamma}{d\omega} \sigma S \right) \mu.$$

Из этой формулы следует достаточно ясный вывод, что чувствительность описываемого метода фазовой демодуляции света возрастает пропорционально частоте модуляции Ω и логарифмической производной $\frac{d\ln\gamma}{d\omega}$ зависимости коэффициента поглощения материала от частоты внутри запрещенной зоны.

Положим, что фоторезистор имеет согласованную нагрузку R . Тогда эффективное напряжение на входе предусилителя имеет вид

$$U = \frac{1}{2} i_c R = \left(\frac{1}{2} \frac{e}{\hbar\omega} \frac{d\ln\gamma}{d\omega} \sigma S R \Omega \right) \mu. \quad (4)$$

Выбор максимальной частоты $f = \frac{\omega}{2\pi}$ (Гц) модуляции определяется либо эквивалентной емкостью C и сопротивлением R , либо временем τ . Рассмотрим первый вариант и будем считать $f \approx \frac{1}{RC}$.

Тогда из формулы (4) получим

$$U = \left(\frac{1}{2} \frac{e\lambda}{cC} \frac{d\ln\gamma}{d\hbar\omega} \sigma S \right) \mu, \quad (5)$$

где λ — длина волны света. Предельная разрешающая способность фоторезистора будет определяться тепловыми шумами, среднеквадратичное значение которых при температуре T дается известной формулой: $U_n = \sqrt{2k_B T R \Delta}$, где Δ — ширина информационной полосы, либо величина, обратная характерному времени усреднения измерительного тракта. Минимально обнаруживаемому индексу μ_m соответствует отношение сигнал/шум на входе предусилителя, равное единице. Тогда

$$\mu_m \approx \frac{2cC}{e\lambda\sigma S} \frac{\delta\hbar\omega}{\hbar\delta\ln\gamma} \sqrt{2k_B T R \Delta}.$$

Для следующих характерных значений $C=1$ пФ, $T=300$ К, $R=10^3$ Ом, $\Delta=10^4$ Гц, $\lambda=0.85$ мкм, $\delta\ln\gamma=4$ и $\delta\hbar\omega \leq 0.2$ эВ [2] получим $\mu_m \leq 0.004$. Отсюда видно, что имеется заметный запас по предельной чувствительности фазового фотодетектора.

В заключение отметим, что температурную зависимость коэффициента передачи такого детектора можно оценить из правила Урбаха [3], согласно которому $\frac{d\ln\gamma}{d\gamma} \approx \frac{\hbar}{gT}$, где g — некоторая эмпирическая постоянная. Отсюда и из (5) видно, что $\frac{\delta U}{\mu} \approx \frac{\delta T}{T}$, т. е. скомпенсировать температурные дрейфы этого коэффициента можно с помощью обычного терморезистора.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Долгов М.В., Попов Ю.М., Селезнев В.Н., Сагитов Р.Г., Шарфф В. Спектрально-чувствительное фотоприемное устройство. // А.С № 1554689 от 1 декабря 1989.
- [2] Гауэр Дж. Оптические системы связи. М.: Радио и связь, 1989.
- [3] Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990. 688 с.

Московский
физико-технический
институт

Поступило в Редакцию
22 апреля 1992 г.