

УДК 621.373.5

АВТОДИННЫЕ И МОДУЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНЖЕКЦИОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

Е. М. Гершензон, Б. Н. Туманов, Б. И. Левит

На основе скоростных уравнений проведено теоретическое изучение автодинных и модуляционных характеристик инжекционных полупроводниковых лазеров с учетом вклада спонтанного излучения. Экспериментально исследована модуляционная способность гетероструктурных лазеров с различными факторами спонтанного излучения. Предложена методика расчета максимально достижимого коэффициента автодинного усиления полупроводниковых лазеров по пику их модуляционной способности.

В радиочастотном и СВЧ диапазонах волн хорошо известны автодинные системы, обладающие высокой чувствительностью в сочетании с конструктивной простотой, что обуславливает их применение для решения различных задач ближней радиолокации [1], радиоспектроскопии [2, 3] и других целей (например, [4, 5]). Принцип работы подобных систем основан на автодинном эффекте, заключающемся в изменении параметров автоколебаний генератора под действием излучения, отраженного от объекта исследования. Автодинный сигнал обычно регистрируется в цепи питания генератора (режим автодетектирования), т. е. автодин сочетает функции приемника и детектора отраженного излучения, но может регистрироваться и специальным детектором, на который отводится небольшая часть генерируемого автодином излучения (режим внешнего детектирования). В последнем случае автодин работает как приемник и усилитель отраженного излучения.

В связи с развитием когерентных источников излучения оптического диапазона — квантовых генераторов — возникает интерес к разработке автодинных систем на их основе. Автодинные системы на газовых лазерах впервые предложены в [6, 7], патенте [8] и под названием «лазерные интерферометры» рассмотрены в работах [9–11]. Высокая чувствительность подобных систем показана в [12, 13]. Автодинные системы на основе полупроводниковых лазеров изучаются в работах [14–16], авторы которых применяют для исследуемых систем разнообразные названия: «лазер с внешним резонатором», «трехзеркальный лазер», «самовоздействующая система». Автодинный эффект в газовых лазерах с учетом конечного времени реакции автодина на внешнее воздействие и процесс автодетектирования в таком автодине рассмотрены в [17]. Интересная особенность работы лазерных автодинных систем — возможность переноса несущей частоты за счет связи энергетических уровней его активного вещества — рассмотрена в работах [18, 19].

Теоретическое описание автодинного приема когерентного излучения инжекционным полупроводниковым лазером (ИПЛ) впервые проведено в [20]*, где рассмотрен механизм автодетектирования и рассчитан автодинный коэффициент усиления по мощности, имеющий reso-

* Авторы этой работы применяют термин «гетеродинный прием».

нансный характер. Отметим, что в указанной работе не учтен вклад спонтанного излучения в генерируемые моды, хотя во многих вопросах динамики излучения ИПЛ, например при объяснении природы многомодовой структуры его излучения, этот фактор имеет существенное значение [21].

Целью данной работы является изучение параметров ИПЛ, определяющих его автодинные свойства, т. е. величину сигнала внешнего детектирования и автодетектирования. Для характеристики автодинного эффекта в ИПЛ принят коэффициент автодинного усиления K_a [17], показывающий во сколько раз амплитуда автодинного отклика генератора превышает амплитуду регистрируемого при прямом приеме отраженного излучения. При описании ИПЛ автодинов нами проведен учет вклада спонтанного излучения в генерируемые моды, с которым приходится считаться вблизи порога генерации, где коэффициент автодинного усиления K_a достигает наибольших значений. Величина этого вклада, влияющая на форму ватт-амперной характеристики ИПЛ, теоретически и экспериментально определена по методике, предложенной в работе [22]. Установлены соотношения между коэффициентом автодинного усиления K_a и модуляционной способностью F_m , которая определяется отношением глубины модуляции мощности генерируемого излучения к амплитуде модуляции инжекционного тока, нормированного к пороговому значению.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Рассмотрим модуляционные и автодинные характеристики ИПЛ с учетом вклада спонтанного излучения. Для анализа динамики излучения ИПЛ обычно применяют «скоростные» уравнения [21, 22], представляющие собой уравнения баланса числа фотонов N_ω и инжектированных электронов N_e в объеме резонатора лазера V_e , которые можно записать в форме

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dt} + \frac{A}{2\tau_p} &= \left(\frac{c}{2n}\right) g(N_e) A + \sigma \frac{N_e}{2\tau_e A}, \\ \frac{dN_e}{dt} + \frac{N_e}{\tau_e} &= -\left(\frac{c}{n}\right) g(N_e) A^2 + G, \end{aligned} \quad (1)$$

где $A = \sqrt{N_\omega}$ — безразмерная амплитуда напряженности поля в резонаторе лазера, $\tau_p = Q_H/\omega_c$ — фотонное время жизни, τ_e — характеристическое время изменения плотности инжектированных электронов, Q_H и ω_c — нагруженная добротность и собственная частота резонатора, $g(N_e)$ — коэффициент усиления активной среды, аппроксимируемый формулой [22, 23],

$$g(N_e) = \beta N_e^m, \quad (2)$$

где $m = 1 \div 3$ в зависимости от типа ИПЛ и условий его эксплуатации,

$$G = \eta_e I/e \quad (3)$$

— скорость инжекции электронов, η_e — квантовая эффективность инжекции, I — инжекционный ток, σ — фактор спонтанного излучения, описывающий вклад спонтанного излучения в генерируемые моды. Отметим, что первое уравнение системы (1) эквивалентно укороченному уравнению для амплитуды колебаний электромагнитного поля в резонаторе ИПЛ, использованному в [20], но дополнительно учитывает вклад спонтанного излучения.

Согласно результатам работы [22] стационарное излучение ИПЛ удобно описывать безразмерными переменными

$$\Phi = \frac{A_0^2}{G_{th} \tau_p}, \quad D = \frac{N_{e0}}{G_{th} \tau_e}, \quad J = \frac{G}{G_{th}} = \frac{I}{I_{th}}, \quad (4)$$

подстановка которых в (1) позволяет получить соотношения

$$D = \frac{J - \Phi}{1 - \sigma}, \quad \Phi = \frac{(J - \Phi)^m \Phi}{(1 - \sigma)^{m-1}} + \sigma J. \quad (5)$$

Решение нелинейного уравнения (5) при различных значениях инжекционного тока J определяет вид нелинейной ватт-амперной характеристики ИПЛ как ниже, так и выше значений порогового тока I_{th} . При этом изменение $\sigma(J)$ по [22] можно аппроксимировать формулой

$$\sigma = \frac{a}{1 + b \exp[c(J - 1)]}, \quad (6)$$

где параметры a , b , c и m подбираются на основе экспериментальных значений $\Phi(J)$ по методу наименьших квадратов при решении уравнения (5). Эта методика позволяет оценить $\sigma(J)$ — фактор спонтанного излучения и его изменение в зависимости от инжекционного тока при сужении полосы генерации ИПЛ [22].

Для описания модуляционных характеристик ИПЛ используем уравнения (1) с учетом (5). При гармонической модуляции инжекционного тока с частотой Ω и достаточно малой амплитудой ($I_m \ll I$) уравнения (1) можно линеаризовать по малым отклонениям амплитуды генерируемых колебаний и числа инжектируемых электронов. Решая полученные уравнения квадратурами, глубину модуляции мощности генерируемого излучения можно выразить как

$$\frac{P_m}{P_0} = F_m \frac{I_m}{I_{th}}, \quad (7)$$

где P_m — амплитуда модуляции генерируемой мощности со средним уровнем P_0 , F_m — модуляционная способность ИПЛ, определяемая соотношением

$$F_m = \frac{K_\Omega}{D \frac{\alpha}{m} \left[1 + m \frac{1+\alpha}{\alpha} \frac{\sigma}{\alpha + \sigma} \right]}, \quad (8)$$

в котором

$$\alpha = \left(\frac{c}{n} \right) A_0^2 \left(\frac{dg}{dN_e} \right)_{N_{e0}} \tau_e = m \Phi D^{m-1} \quad (9)$$

— приведенная крутизна инкремента ИПЛ, учитывающая степень его регенерации,

$$K_\Omega = \left\{ 1 + (\Omega \tau_p)^2 \frac{2(\gamma_R \tau_e)^2 - [2(\omega_R \tau_e)^2 - (\Omega \tau_e)^2]}{D^{2m} [\alpha + \sigma + m \sigma (1 + \alpha)/\alpha]^2} \right\}^{\left(-\frac{1}{2}\right)} \quad (10)$$

— модуляционный коэффициент, описывающий изменение F_m с изменением частоты модуляции Ω , ω_R и γ_R — частота и затухание релаксационных колебаний [23], которые определяются соотношениями

$$\omega_R^2 = (\alpha + \sigma) \frac{D^m}{\tau_e \tau_p} - \frac{1}{4} \left(\frac{1 + \alpha}{\tau_e} - \frac{\sigma}{\tau_p} \frac{m D^m}{\alpha} \right)^2; \quad (11)$$

$$\gamma_R = \frac{1}{2} \left(\frac{1 + \alpha}{\tau_e} + \frac{\sigma}{\tau_p} \frac{m D^m}{\alpha} \right). \quad (12)$$

Из (10) видно, что модуляционный коэффициент K_Ω имеет резонансный характер в области частот $\Omega \approx \omega_R$. Этот резонанс без учета вклада спонтанного излучения подробно изучен в [23–25]. При частотах $\Omega \ll \omega_R$ ($\Omega \tau_p \ll 1$) $K_\Omega \approx 1$ для всех значений инжекционного тока I , и зависимость $F_m(I)$ полностью определяется изменением α и σ по (5), (6) и (9). Это позволяет изучить изменение $F_m(I)$ без учета частотных свойств, что удобно для дальнейшего анализа.

Автодинный эффект в ИПЛ можно рассмотреть по общей методике, описанной в работе [17], где показано, что действие отраженного излучения на генератор любого типа сводится к модуляции нагруженной добротности и собственной частоты его резонатора. Пренебрегая достаточно малыми сдвигами частоты, получаем для фотонного времени жизни τ_p в резонаторе ИПЛ при воздействии малого отраженного излучения выражение

$$\frac{1}{\tau_p'} = \frac{\omega_c'}{Q_H'} \approx \frac{\omega_c}{Q_H} \left(1 - 2\Gamma \frac{Q_H}{Q_{вн}} \cos \delta \right), \quad (13)$$

где $\Gamma \ll 1$ — амплитудный коэффициент отражения с учетом всех потерь, $Q_{вн}$ — внешняя добротность резонатора, δ — разность фаз генерируемого и отраженного излучения на зеркале резонатора. Считая движение отражателя равномерным, можно записать, что $\delta = \Omega t$, где Ω — доплеровская частота.

Подставляя (13) в (1), линеаризуя полученные уравнения по малым отклонениям амплитуды $a(t)$ и числа инжектируемых электронов $n_e(t)$ и решая линеаризованные уравнения квадратурами, получаем

$$\frac{a}{A_0} = \Gamma K_a \cos(\Omega t + \psi_a); \quad (14)$$

$$\frac{n_e}{G_{th} \tau_e} = \Gamma K_a \frac{2\Phi D^m}{(1 + \alpha) \sqrt{1 + [\Omega \tau_e / (1 + \alpha)]^2}} \cos(\Omega t + \psi_n), \quad (15)$$

где K_a — коэффициент автодинного усиления, являющийся основной количественной характеристикой автодинного эффекта в генераторе, в рамках проведенных вычислений определяемый выражением

$$K_a = \frac{(Q_H/Q_{вн}) K_\Omega \sqrt{1 + [\Omega \tau_e / (1 + \alpha)]^2}}{D^m \frac{\alpha + \sigma}{1 + \alpha} \left[1 + m \frac{1 + \alpha}{\alpha} \frac{\sigma}{\alpha + \sigma} \right]}. \quad (16)$$

Сопоставление выражений (8) и (16) показывает возможность определения коэффициента автодинного усиления ИПЛ K_a по его модуляционной способности F_m .

Заметим, что выражения (14)–(16) получены в предположении, что источником питания ИПЛ является стабилизатор тока. Если источник питания ИПЛ является стабилизатором напряжения, то нужно учитывать изменение инжекционного тока при изменении числа инжектированных электронов $n_e(t)$ [20]. Для учета этой поправки и описания

процесса автодетектирования в ИПЛ можно использовать условие нормировки для числа инжектированных электронов

$$\frac{N_e}{V_c} = \int_0^{\infty} g_e(W) f_e(W) dW \quad (17)$$

и предположить, что состояние инжектированных электронов является квазиравновесным в любой момент времени с квазиуровнем Ферми $F_e(t)$, изменяющимся при вариации числа электронов $n_e(t)$, а излучательные переходы происходят из хвоста зоны проводимости, где плотность состояний по энергиям W описывается формулой

$$g_e(W) = g_0 \exp(W/W_0), \quad (18)$$

в которой W_0 — эффективный параметр легирования на узкий акцепторный уровень.

Подставляя (18) в (17), используя условие $kT < W_0 \ll F_e$ (справедливость использованных предположений подробно показана в [21]) и считая, что изменение напряжения на p — n -переходе $u_a(t)$ связано с вариацией квазиуровня Ферми $F_e(t)$ [20], получаем

$$u_a(t) = \frac{\Delta F_e}{e} = \frac{W_0}{e} \frac{n_e(t)}{N_{e0}}. \quad (19)$$

Выражение (19) с учетом (15) показывает, что в ИПЛ автодине с источником питания, стабилизирующим инжекционный ток, сигнал автодетектирования проявляется в модуляции напряжения на p — n -переходе ИПЛ,

$$u_a(t) = \Gamma \frac{W_0}{e} K_a \frac{2\Phi D^{m-1}}{(1 + \alpha) \sqrt{1 + [\Omega \tau_e / (1 + \alpha)]^2}} \cos(\Omega t + \psi_n). \quad (20)$$

Если источник питания ИПЛ стабилизирует напряжение на p — n -переходе и последовательно подключенном к нему нагрузочном резисторе R_a (этот случай и рассмотрен в [20]), то изменение $n_e(t)$ приведет к вариации инжекционного тока, определяемой из условия, что изменение падения напряжения на резисторе R_a соответственно равно $u_a(t)$. Последнее и является сигналом автодетектирования ИПЛ автодина с таким источником питания. В этом случае в линеаризованных уравнениях, описывающих ИПЛ автодин, появляется дополнительный член, обусловленный вариацией скорости накачки $G(t)$ по соотношению (3). Используя условие (19), легко показать, что для такого ИПЛ автодина все приведенные выше соотношения справедливы при замене $(1 + \alpha)$ на $(1 + \alpha + \rho)$, где фактор ρ определяется выражением

$$\rho = \frac{W_0/e}{DI_{th} R_a}. \quad (21)$$

Таким образом, при $W_0 \approx 10^{-2}$ эВ [21] и $I_{th} = 100$ мА различие в источниках питания ИПЛ начнет сказываться при $R_a \leq 0,1$ Ом.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки коэффициента автодинного усиления ИПЛ при различных вкладах спонтанного излучения нами проведены экспериментальные исследования ватт-амперной характеристики и модуляционной способности гетероструктурных ИПЛ, работающих в непрерывном режиме. Ватт-амперная характеристика исследованных ИПЛ определялась по

мощности генерируемого излучения с помощью ФЭУ-28 и фотодиода ФД-9К, работающих в режимах, далеких от области насыщения, при значениях инжекционного тока выше и ниже порогового. Определение модуляционной способности ИПЛ проведено на экспериментальной установке, схема которой показана на рис. 1. Исследуемый ИПЛ (1) питался пульсирующим инжекционным током с амплитудой синусоидальной составляющей $I_m = 0,01 I_{th}$ и частотой $\Omega/2\pi = 1 \text{ кГц}$ от звукового генератора (2) и постоянной составляющей I от источника питания (3), являющегося регулируемым стабилизатором тока. Величина постоянной составляющей инжекционного тока регистрировалась миллиамперметром (4). Сигнал фотодиода ФД-9К (5), пропорциональный излучаемой ИПЛ мощности, регистрировался цифровым милливольтметром В7-21 (6), фиксирующим его постоянную составляющую, и ламповым милливольтметром ВЗ-2 (7), фиксирующим амплитуду его переменной составляющей.

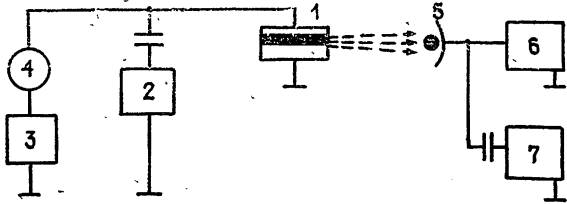


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения модуляционной способности ИПЛ:

1 — исследуемый ИПЛ, 2 — звуковой генератор, 3 — регулируемый стабилизатор тока для питания ИПЛ, 4 — амперметр, 5 — фотодиод, 6 — вольтметр для регистрации постоянной составляющей, 7 — вольтметр для регистрации переменной составляющей.

Расчет фактора спонтанного излучения $\sigma(J)$ по экспериментальной ватт-амперной характеристике производился по методу, предложенному в работе [22]. При этом полученные экспериментальные значения пересчитывались к безразмерным переменным Φ и J (4) и определение $\sigma(J)$ производилось подбором параметров a , b и c в соотношении (6) и m по методу наименьших квадратов при аппроксимации экспериментальных значений $\Phi(J)$ теоретической кривой, полученной при решении уравнения (5). На рис. 2 представлены результаты указанных расчетов для трех из исследованных нами ИПЛ, имеющих существенно различные факторы спонтанного излучения (кривые 1, 2, 3 соответствуют параметрам $a = 0,00974; 0,0247; 0,171$, $b = 5,55; 1,043; 0,380$, $c = 10,55; 15,83; 6,29$ при $m = 3$ для всех ИПЛ). Различными символами на рис. 2 отмечены экспериментальные значения $\Phi(J)$ для соответствующих ИПЛ. Пороговые токи указанных ИПЛ составляли $I_{th} = 80; 106$ и 84 мА . Существенное различие фактора спонтанного излучения для выбранных приборов позволяет наглядно показать его влияние на автодинные и модуляционные характеристики ИПЛ.

Частота модуляции при экспериментальном определении модуляционной способности ИПЛ F_m по схеме рис. 1 выбрана существенно меньшей, чем частота модуляционного резонанса (теоретические оценки и эксперименты, проведенные в [20, 23–25]), дают значения $\omega_R/2\pi = 0,1 \div 10 \text{ ГГц}$, поэтому $K_\Omega \approx 1$ и соответствующие теоретические значения F_m определены по формуле (8), где приведенная крутизна инкремента $\alpha(J)$ и фактор спонтанного излучения $\sigma(J)$ рассчитаны по соотношениям (5), (6) и (9) с учетом найденных выше значений a , b , c и m .

Результаты этих расчетов приведены на рис. 3, где кривые 1, 2, 3 соответствуют указанным выше ИПЛ. Там же отмечены экспериментальные значения F_m . Хорошее совпадение расчетных кривых и экспериментальных данных свидетельствует о справедливости принятых в теоретическом анализе приближений. Из рис. 3 видно, что форма кривой $F_m(J)$ существенно определяется значениями фактора спонтанного излучения $\sigma(J)$. Для ИПЛ с низкими значениями σ характерен пик модуляционной способности в области $I \approx I_{th}$.

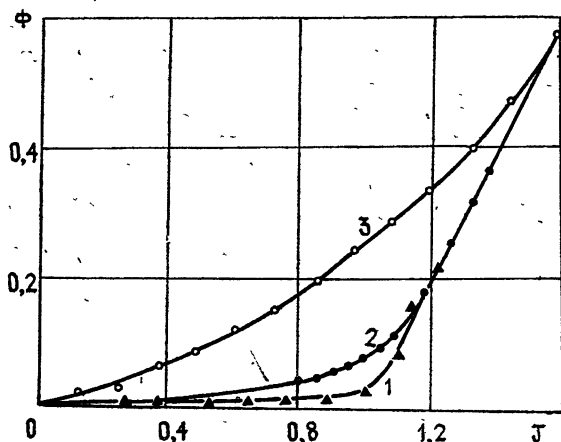


Рис. 2. Ватт-амперная характеристика исследованных ИПЛ в безразмерных переменных:

1, 2, 3 — расчетные кривые при $a = 0,00974; 0,0247; 0,171$, $b = 5,55; 1,043; 0,380$, $c = 10,55; 15,83; 6,29$ соответственно, $m = 3$ для всех ИПЛ. Символами отмечены экспериментальные значения.

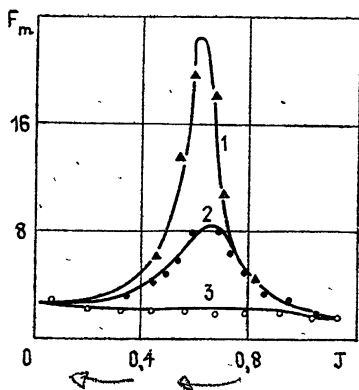


Рис. 3.

Рис. 3. Модуляционная способность исследованных ИПЛ:

1, 2, 3 — расчетные кривые при найденных выше параметрах a , b , c и m . Символами отмечены экспериментальные значения.

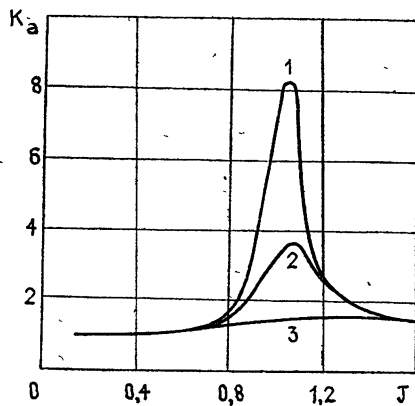


Рис. 4.

Рис. 4. Расчетные значения коэффициента автодинного усиления исследованных ИПЛ: 1, 2, 3 — расчетные кривые при найденных выше параметрах a , b , c и m при $Q_d/Q_{вв} = 1$.

Проведенные эксперименты позволяют по соотношению (16) оценить основную характеристику автодинного эффекта — коэффициент автодинного усиления K_a исследованных нами ИПЛ на доплеровских частотах, существенно меньших частоты релаксационных колебаний.

Результаты таких расчетов при $Q_{\text{н}}/Q_{\text{вн}} = 1$ приведены на рис. 4. Видно, что максимальное значение K_a определяется малостью фактора спонтанного излучения и достигается вблизи порога генерации ИПЛ. Последнее является общим свойством автодинных систем. Отметим также, что полученные значения K_a примерно на два порядка меньше коэффициента автодинного усиления газовых лазеров [17]. Значения коэффициента усиления по мощности для ИПЛ автодинов, рассчитанные в работе [20] без учета фактора спонтанного излучения, оказываются завышенными. Следует ожидать, что за счет улучшения качества ИПЛ, т. е. уменьшения у них значений σ , K_a можно существенно увеличить.

Сравнение кривых, приведенных на рис. 3 и 4, показывает, что высота пика модуляционной способности ИПЛ может быть однозначно связана с максимальным значением коэффициента автодинного усиления для диодов с малым вкладом спонтанного излучения. В области $I \approx I_{\text{th}}$ и $\sigma \ll 1$ согласно (5) $D \approx 1$. Тогда согласно (8) и (9) для $\Omega \ll \omega_R$ пик модуляционной способности F_m^{max} будет при

$$\alpha_F = \sqrt{\sigma m} - \sigma \approx \sqrt{\sigma m}, \quad (22)$$

а высота его составляет

$$F_m^{\text{max}} \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{m}{\sigma}}. \quad (23)$$

Максимальное значение коэффициента автодинного усиления K_a^{max} при тех же условиях согласно (16) достигается при

$$\alpha_K = \sqrt{\sigma m}, \quad (24)$$

т. е. примерно при тех же значениях инжекционного тока, что и пик модуляционной способности, и составляет

$$K_a^{\text{max}} \approx \frac{Q_{\text{н}}/Q_{\text{вн}}}{2 \sqrt{m \sigma}}. \quad (25)$$

Таким образом,

$$K_a^{\text{max}} \approx \frac{F_m^{\text{max}}}{m} \left(\frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{вн}}} \right). \quad (26)$$

Оценочные расчеты по формуле (26) хорошо соответствуют результатам, приведенным на рис. 3 и 4, и могут применяться для определения коэффициента автодинного усиления ИПЛ по его модуляционной способности.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, коэффициент автодинного усиления ИПЛ K_a , характеризующий автодинный эффект, достигает максимальных значений вблизи порога генерации и ограничивается фактором спонтанного излучения σ .

У высококачественных ИПЛ с малыми значениями σ модуляционная способность F_m имеет в области пороговых значений инжекционного тока пик, высота которого ограничивается σ и однозначно связана с максимальным значением K_a .

ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Коган, Теоретические основы радиолокации на малых расстояниях, Итоги науки и техники, серия Радиотехника, т. 13, изд. ВИНТИ, М., 1976.
2. Е. М. Гершензон, П. А. Путилов, Н. В. Соина, Радиотехника и электроника, 11, № 10, 1771 (1966).

3. Е. М. Гершензон, А. А. Негирев, Б. Н. Туманов, ПТЭ, 2, 115 (1972).
4. T. H. Wilmshurst, J. E. Rizzo, J. Phys., E: Sci. Instrum., 7, 924 (1974).
5. Е. М. Гершензон, Л. А. Орлов, Э. Л. Шимичева, ПТЭ, 2, 185 (1967).
6. P. T. Bolwijn, Th. H. Peek, C. Th. J. Alkemade, Phys. Lett., 23, 88 (1966).
7. Th. H. Peek, P. T. Bolwijn, C. Th. J. Alkemade, Am. J. Phys., 35, 820 (1967).
8. Патент США, кл. 35628 (G 01P3/36, H 01S3/00), № 3958881, заявл. 18.11.1970 (№ 90526), опублик. 25.05.1976.
9. И. М. Белоусова, О. Б. Данилов, А. Ф. Запрягаев, ЖТФ, 41, № 5, 1028 (1971).
10. А. Ф. Запрягаев, ЖТФ, 45, № 1, 197 (1975).
11. В. А. Боднер, Ю. Ф. Застрогин, в сб. Приборы точной механики, т. 1, 1976.
12. И. Л. Берштейн, Изв. вузов — Радиофизика, 16, № 4, 526 (1973).
13. И. Л. Берштейн, Д. П. Степанов, Изв. вузов — Радиофизика, 16, № 4, 531 (1973).
14. A. Seko, Y. Mitsuhashi, T. Morikawa, J. Shimada, K. Sakurai, Appl. Phys. Lett., 27, 140 (1975).
15. Y. Mitsuhashi, T. Morikawa, K. Sakurai, A. Seko, J. Shimada, Opt. Commun., 17, 96 (1976).
16. T. Morikawa, Y. Mitsuhashi, J. Shimada, Y. Kojima, Electron. Lett., 12, 435 (1976).
17. Б. Н. Туманов, Б. И. Левит, А. С. Бабич, Изв. вузов — Радиофизика, 21, № 9, 1260 (1978).
18. М. Е. Герценштейн, Изв. вузов — Радиофизика, 10, № 6, 882 (1967).
19. М. Е. Герценштейн, А. Н. Мартыанов, В. В. Кобзев, В. Г. Таценко, Радиотехника и электроника, 17, № 1, 196 (1972).
20. Р. Ф. Казаринов, Р. А. Сурис, ЖЭТФ, 66, № 3, 1067 (1974).
21. Л. А. Ривлин, Динамика излучения полупроводниковых квантовых генераторов, изд. Сов. радио, М., 1976.
22. R. Salathe, C. Voumard, H. Weber, Opto-electron., 6, 451 (1974).
23. M. J. Adams, Opto-electron., 5, 201 (1973).
24. T. Ikegami, Y. Suematsu, Proc. IEEE, 55, 122 (1967).
25. T. Ikegami, Y. Suematsu, IEEE J. Quant. Electron., QE-4, 148 (1968).

Нижнетагильский государственный
педагогический институт

Поступила в редакцию
2 марта 1979 г.

AUTODYNE AND MODULATION CHARACTERISTICS OF INJECTION SEMICONDUCTOR LASERS

E. M. Gershenzon, B. N. Tumanov, B. I. Levit

Based on rate equations a theoretical study of autodyne and modulation characteristics of injection semiconductor lasers is carried out taking account of spontaneous emission contribution. Modulation capability of heterostructure lasers with different factors of spontaneous emission is investigated experimentally. A method of calculation of maximum coefficient of autodyne amplification for semiconductor lasers over the peak of their modulation capability is suggested.