

Акустоэлектронное взаимодействие в лазерных гетероструктурах InGaAsP/InP

© Л.А. Кулакова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: L.Kulakova@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 21 февраля 2005 г.)

Исследована динамика изменения спектральных характеристик излучения лазерной гетероструктуры под влиянием переменной деформации, обусловленной поверхностной акустической волной. Выполнены исследования спектрального распределения интенсивности лазерного излучения с целью выявления механизмов взаимодействия в исследуемых структурах. Предложена модель и проведен теоретический анализ полученных экспериментальных результатов. Показано, что определяющую роль при воздействии поверхностными волнами играет акустоэлектронное взаимодействие. Из сравнения теоретических расчетов с экспериментальными данными получены значения девиации наблюдающейся частотной модуляции излучения.

Работа поддержана программой „Фундаментальные исследования в области физических наук“ Министерства науки и образования РФ (№ 37.029.1.1.0029/1) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-02-16205).

1. Введение

Известно, что упругая деформация, благодаря деформационному потенциалу, приводит к изменению как свойств электронной подсистемы в полупроводниках, в частности к изменению ширины запрещенной зоны [1,2], так и к изменению диэлектрической проницаемости [3,4]. Можно ожидать, что эффект изменения ширины запрещенной зоны в присутствии деформации будет проявляться в лазерных гетероструктурах, приводя к изменению условий генерации, изменяя спектральные характеристики излучения, в частности частоту генерации. Изменение коэффициента преломления лазерного резонатора в присутствии деформации должно также влиять на спектральные характеристики излучения. Ранее [5] нами экспериментально было обнаружено возникновение частотной модуляции излучения гетеролазера в присутствии переменной деформации, обусловленной объемной ультразвуковой волной. В настоящей работе изложены первые результаты исследования механизма деформационного воздействия поверхностных ультразвуковых волн на характеристики излучения лазерных гетероструктур InGaAsP/InP.

2. Методика эксперимента

С целью создания базы для проведения исследований акустоэлектронного и акустооптического взаимодействий в гетеролазерах посредством воздействия поверхностных волн разработана технология формирования гетероструктур на диэлектрических пьезоподложках YZ -среза LiNbO_3 , являющихся звукопроводом для поверхностных акустических волн (ПАВ) Рэлея. Геометрия воздействия поверхностной волной отличается от ситуации с объемной волной [5]. Имеются

в виду пространственные соотношения длины волны звука и толщины активной области, обеспечивающие соответствующие временные параметры воздействия переменной деформации на активную область структуры. Для объемного звука волна, распространяясь поперек активного слоя гетероструктуры, легко обеспечивала выполнение соответствующего соотношения $a \ll \Lambda$, где a — толщина активного слоя гетероструктуры ($a \simeq 200 \text{ \AA}$), Λ — длина волны звука ($\approx 400 \mu\text{m}$). Благодаря этому можно рассматривать меняющиеся во времени электронные и оптические параметры структуры с периодом воздействия переменной деформации, обусловленной в нашем случае объемной ультразвуковой волной. В случае поверхностного звука волна распространяется в плоскости активного слоя, т.е. роль параметра a играет ширина активного слоя, в данном случае ширина d контактного полоска (электрического контакта, через который подводится рабочий ток). Для обеспечения выполнения указанного выше соотношения была создана структура с $d = 6 \mu\text{m}$. Такая структура была смонтирована на подложку (рис. 1). Поверхностная волна (с частотой 10 MHz), возбуждаемая встречно-штыревыми преобразователями (рис. 1), распространялась по пьезоподложке из LiNbO_3 в Z -направлении. Длительность и задержка импульса ПАВ могли изменяться, чтобы обеспечить различные режимы полного или частичного перекрытия с импульсом рабочего тока гетеролазера. В качестве объекта исследований использовались лазерные гетероструктуры InGaAsP/InP (длина оптического резонатора = $750 \mu\text{m}$), работающие при комнатных температурах в импульсном режиме с длительностью до $3 \mu\text{m}$ на длине волны $1.48 \mu\text{m}$. Пороговый ток имел значение 30–35 mA, рабочие токи I_{op} изменялись в интервале от порогового до его трехкратного значения ($I_{\text{op}} = (1-3)I_{\text{th}}$). Полуширина линии

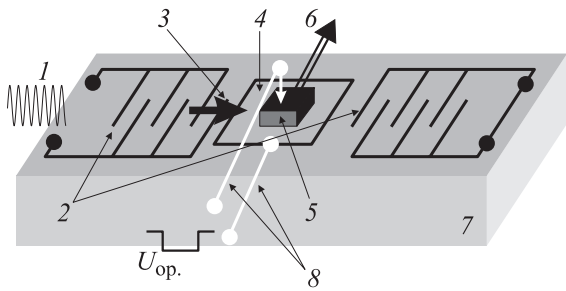


Рис. 1. Схема возбуждения поверхностных акустических волн: 1 — ВЧ-импульс, 2 — встречно-штыревые преобразователи, 3 — ПАВ, 4 — тонкая металлическая пленка, 5 — лазерный диод, 6 — лазерный луч, 7 — пьезоподложка, 8 — электрические контакты.

излучения 0.1–0.2 nm. Регистрация излучения проводилась в трех конфигурациях: 1) прямое измерение; 2) после эталона Фабри–Перо (ЭФП), динамический дисперсионный диапазон которого равен 18.25 Å; 3) посредством анализа спектра излучения с использованием спектрометра МДР23, модифицированного для приема импульсного излучения.

3. Результаты и их обсуждение

Проведенные эксперименты показали, что картина динамики изменения спектральных характеристик излучения (в масштабе реального времени), полученная с помощью ЭФП, в присутствии ПАВ качественно аналогична наблюдавшейся ранее при воздействии объемными волнами [5]. Введение звука (при совпадении импульса звука по времени с импульсом рабочего тока) приводит к почти 100% амплитудной модуляции импульса излучения с частотой, равной частоте ультразвуковой волны. При увеличении частоты звука наблюдается соответствующее этому уменьшение периода модуляции импульса излучения. При уменьшении задержки импульса тока, приводящего к частичному перекрытию этих импульсов, наблюдается соответствующая частичная модуляция импульса излучения. Совершенно очевидно, что наблюдаемая модуляция является следствием изменения пропускания ЭФП из-за частотной модуляции проходящего через него излучения. Максимальный диапазон частотной перестройки в рамках одного полупериода звуковой волны можно оценить, воспользовавшись методикой, представленной в [5]. В результате такой оценки получаем значение амплитуды модуляции до 4–4.5 Å (при акустической мощности 1–2 W), близкое к оценкам, полученным для объемных волн.

Дополнительно к эксперименту с воздействием объемных волн при воздействии ПАВ нам удалось наблюдать смену фазы модуляции (на 180°) пропускания ЭФП при увеличении рабочего тока до значений, обеспечивающих прохождение всего дисперсионного диапазона эталона, а следовательно, переход от прямой зависимости пропус-

кания ЭФП от длины волны к обратной (или наоборот). Это лишний раз подтверждает правильность нашей трактовки о частотной модуляции излучения под влиянием звука, а также свидетельствует в пользу более стабильного излучения вновь полученных структур. Поэтому именно эти образцы были использованы для постановки и проведения исследований механизма воздействия упругих волн на лазерные гетероструктуры, обеспечивающего соответствующее изменение спектральных характеристик генерируемого излучения. Напомним, что такое воздействие может осуществляться в основном посредством двух известных нам механизмов.

1) Акустооптическое взаимодействие обуславливает изменение во времени диэлектрической проницаемости $\delta\epsilon$, а следовательно, и коэффициента преломления Δn . Такое изменение определяется величиной ультразвуковой деформации S_j [3] и соответствующей компоненты p_{ij} модуля фотоупругости

$$\Delta n_i = 1/2(\epsilon_0)^{3/2} p_{ij} S_j^0 \sin \Omega t, \quad (1)$$

где $i = mn$, $j = lk$ ($m, n, l, k = 1, 2, 3$). Модуляция коэффициента преломления приводит к соответствующему изменению резонансных частот $\Delta\lambda_k$ оптического резонатора гетероструктуры

$$\frac{\Delta\lambda_k}{\lambda_k} = \frac{\Delta n}{n}, \quad (2)$$

где k — номер резонансной частоты.

2) Акустоэлектронное взаимодействие приводит к изменению ширины запрещенной зоны активной области ($E_g = E_g^0 + \Delta E_g$) гетероструктуры, которое определяется величиной ультразвуковой деформации и соответствующей константой деформационного потенциала Λ_j [1] материала активного слоя

$$\Delta E_g = \Lambda_j S_j^0 \sin \Omega t. \quad (3)$$

Изменение ширины зоны должно приводить к соответствующему изменению во времени как квантовой эффективности лазерной структуры, так и частоты максимального усиления

$$\omega_m = \omega_m^0 + 2\pi F \sin \Omega t, \quad (4)$$

F — амплитуда частотной модуляции (девиация) может быть вычислена из (3): $F = \Lambda_j S_j^0 / h$ (для чего необходимо знание величины константы деформационного потенциала и амплитуды деформации упругой волны) либо из экспериментальных данных по изменению спектра под влиянием деформации.

Знание роли и относительного вклада этих механизмов имеет не только фундаментальное, но и важное практическое значение. Последнее обстоятельство стимулирует поиск структур, в которых будут вносить эффективный вклад оба механизма взаимодействия, причем необходимо, чтобы результаты воздействия на

электронные и оптические свойства приводили к сложению эффектов. В таком случае возможно наиболее эффективное управление спектральными характеристиками гетероструктур.

Проанализируем один из возможных механизмов наблюдавшейся частотной модуляции. Если такая модуляция является следствием модуляции ширины запрещенной зоны E_g , вводимой деформацией $S(t) \sim \sin \Omega t$, т.е. $E_g \sim \sin \Omega t$, то помимо наблюдения частотно-модулированной компоненты следует ожидать проявления модуляции квантовой эффективности, а следовательно, и коэффициента усиления из-за модуляции концентрации возбужденных электронов. Поскольку глубина модуляции ΔE_g , по нашим оценкам, невелика и имеет величину $\sim 10^{-3}$, этот эффект должен наблюдаться в непосредственной близости от порога генерации, т.е. должно выполняться соотношение $(I_{op} - I_{th})/I_{th} \ll 1$. При этом важно, чтобы гетероструктура была в высокой степени однородной по длине лазерного резонатора. Наши измерения тонкой структуры интенсивности излучения вблизи порога с использованием режима прямого детектирования быстро нарастающих процессов (высокоскоростного — $\tau_d \leq 5$ ns) приемного фотодиода и относительно широкополосного (полоса до 400 MHz) усилителя и осциллографа (полоса 100 MHz) выявили амплитудную модуляцию генерируемого излучения с периодом, равным периоду звуковой волны. Величина амплитудно-модулированной компоненты составляла около 10% от уровня излучения в припороговой области, далее с возрастанием рабочего тока абсолютное значение ее практически не менялось, а процентное соотношение падало до $10^{-1} - 10^{-2}\%$, как и следовало бы ожидать. Поэтому с возрастанием рабочего тока (при уходе от порога генерации) эта компонента становится незначительной по сравнению с уровнем генерации. Таким образом, обнаруженная компонента амплитудной модуляции является, с одной стороны, принципиальным свидетельством воздействия переменной деформации на электронную систему активной области гетеролазера, с другой стороны, демонстрирует высокое качество исследуемых структур. Таким образом, все это свидетельствует в пользу заметного вклада акустоэлектронного взаимодействия. Однако все наблюдавшиеся эффекты являются необходимыми, но недостаточными для утверждения преимуществ акустоэлектронного относительно акустооптического взаимодействия. Разделить эти вклады, по нашему мнению, можно, лишь, используя спектрометрические данные.

Для выявления роли указанных механизмов в работе проведен спектральный анализ излучения посредством анализатора спектра МДР23, модифицированного для регистрации быстро протекающих процессов. Исследование спектрального распределения лазерного излучения представляет собой статический вариант спектрального анализа в отличие от динамического анализа спектра, осуществляемого в реальном масштабе времени

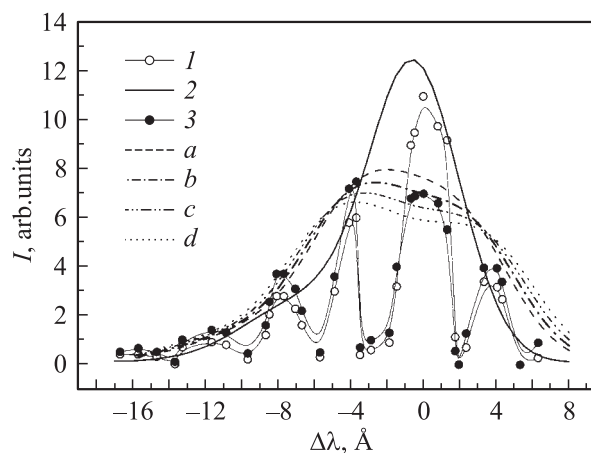


Рис. 2. Спектральное распределение излучения гетеролазера; 1, 3 — экспериментальные данные без упругой волны и в ее присутствии соответственно, 2 — теоретическая подгонка исходного распределения, согласно (5); a-d — теоретический расчет изменения распределения (согласно (7)) под влиянием ПАВ с амплитудой перестройки длины волны излучения $\Delta\lambda_s = 4, 4.5, 5, 5.5$ Å соответственно.

посредством ЭФП. Поэтому он позволяет получать данные о тонкой структуре спектра излучения и является удобным методом для решения поставленной задачи о выявлении различных механизмов взаимодействия. Вкратце поясним, как может изменяться наблюдаемая спектральная картина под влиянием ультразвука для случаев различных механизмов взаимодействия.

Как известно, на выходе спектрометра регистрируется усредненная во времени картины спектра, т.е. одна или несколько линий (в зависимости от режима генерации: одночастотного или многочастотного). Ширина линий определяется добротностью, расстояние между ними — длиной оптического резонатора структуры, интенсивность линий и их количество — положением (на оси частот) и шириной линии усиления активного слоя.

Введение звука в случае преобладающего акустооптического взаимодействия должно приводить к колебанию линий излучения вокруг равновесного положения со скоростью изменения ультразвуковой деформации. При усреднении спектра во времени такой процесс будет приводить к видимому уменьшению интенсивности линии в центре и ее уширению. Аналогичный эффект следует ожидать и в случае акустоэлектронного взаимодействия, однако все эти особенности должны относиться уже к линии усиления. В этом случае будет наблюдаться перераспределение интенсивности линий излучения: интенсивность основной равновесной линии должна уменьшаться, а боковые линии — возрастать.

На рис. 2 (кривая 1) представлены экспериментальные данные спектрального распределения интенсивности излучения исследуемой гетероструктуры, где в качестве переменной использовано отклонение $\Delta\lambda$ длины волны излучения от длины волны λ_0 регистрируемой мак-

симальной интенсивности: $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$, $\lambda_0 = 1.48 \mu\text{m}$. Введение поверхностной волны (кривая 3 на рис. 2) приводит к описанному выше перераспределению интенсивности излучения между линиями, в то время как заметного уширения линий не наблюдается.

Проанализируем полученные данные. Поскольку из-за природы эффектов линия усиления лазерной гетероструктуры не является симметричной, для ее описания мы воспользуемся функцией распределения Гаусса с двумя максимумами

$$I(\Delta\lambda) = I_0 + A_1 \exp\left(-\frac{2(\Delta\lambda - \Delta\lambda_{m1})^2}{w_1^2}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{2(\Delta\lambda - \Delta\lambda_{m2})^2}{w_2^2}\right), \quad (5)$$

где I_0 — постоянный фоновый уровень, $\Delta\lambda_{m1,m2} = \lambda_{m1,m2} - \lambda_0$; $\lambda_{m1,m2}$ — длины волн максимумов, а w_1, w_2 — ширины соответствующих распределений. Подгонка данных в отсутствие звука, согласно (5), представлена на рис. 2 кривой 2 со следующими значениями параметров: $I_0 = 0.1$, $A_1 = 12$, $w_1 = 5 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda_{m1} = -0.5 \text{ \AA}$, $A_2 = 2.4$, $w_2 = 6.5 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda_{m2} = -6.7 \text{ \AA}$.

Поскольку $2\pi F/\omega_m^0 = |\Delta\lambda_s/\lambda_0|$, влияние звука можно учитывать как изменение положения максимума излучения на оси длин волн с периодом звуковой волны, т.е. в присутствии звука изменение во времени спектральной функции распределения может быть представлено следующим выражением:

$$I(\Delta\lambda, t) = I_0 + A_1 \exp\left(-\frac{2(\Delta\lambda - \Delta\lambda_{m1} + \Delta\lambda_s \sin \Omega t)^2}{w_1^2}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{2(\Delta\lambda - \Delta\lambda_{m2} + \Delta\lambda_s \sin \Omega t)^2}{w_2^2}\right). \quad (6)$$

Для получения данных об изменении усредненного спектра под влиянием упругой волны необходимо усреднить выражение (6) по периоду ультразвуковой волны

$$I(\Delta\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I(\Delta\lambda, \Omega t) d(\Omega, t). \quad (7)$$

Результаты численного расчета интегрирования, согласно (7), с подинтегральной функцией из (6) представлены для различных значений $\Delta\lambda_s$ кривыми *a-d* на рис. 2. Из рисунка видно, что наилучшее совпадение экспериментальных и расчетных данных наблюдается для $\Delta\lambda_s = 4.5 \text{ \AA}$, откуда следует значение величины девиации $F = 60 \text{ GHz}$ ($F = (c\Delta\lambda_s)/\lambda_0^2$, c — скорость света), что хорошо согласуется с данными, полученными ранее из динамического спектрального анализа. Таким образом, анализ полученных спектральных данных показал, что в исследуемых структурах под влиянием поверхностной акустической волны происходит главным образом модуляция ширины запрещенной зоны гетероструктуры, приводящая к модуляции частоты генерации

за счет колебаний во времени линии усиления. Все эти результаты указывают на преобладающую роль акустоэлектронного взаимодействия в данных условиях.

4. Заключение

В работе получены следующие результаты.

Разработана и реализована методика эффективно возбуждения в лазерных гетероструктурах поверхностных звуковых волн. Осуществлено возбуждение ультразвука с частотой 10 MHz в гетероструктурах InGaAsP/InP.

Проведен как динамический, так и статический спектральный анализ излучения исследуемых структур в присутствии поверхностной акустической волны Рэлея.

Результаты динамического анализа качественно и количественно близки к данным для объемных волн.

Из данных статического спектрального анализа установлено, что в исследуемых структурах под влиянием поверхностной акустической волны происходит, главным образом, модуляция ширины запрещенной зоны гетероструктуры, приводящая к модуляции частоты генерации за счет колебаний во времени линии усиления. Предложена теоретическая модель описания изменения спектрального распределения под влиянием переменной деформации. Из сравнения экспериментальных данных с теоретическим расчетом получено значение девиации $F = 60 \text{ GHz}$, которое хорошо согласуется с оценками, полученными из динамического анализа спектра. Из комплекса данных показана преобладающая роль акустоэлектронного взаимодействия в исследуемых условиях.

Список литературы

- [1] Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. Наука, М. (1972). 485 с.
- [2] Ю.В. Илисавский, Л.А. Кулакова. ФТТ **23**, 11, 3299 (1981).
- [3] F. Pockels. Ann. Phys. Chem. (Leipzig) **37**, 269 (1889).
- [4] Н.С. Аверкиев, Ю.В. Илисавский, Л.А. Кулакова. ФТТ **38**, 12, 3556 (1996).
- [5] Л.А. Кулакова. И.С. Тарасов. Письма ЖЭТФ **78**, 2, 77 (2003).