

Вынужденное излучение GaAs:Er,O на длине волны 1538 нм

П.Г.Елисеев*, С.В.Гастев**, А.Коизуми***, Ю.Фудживара***, Я.Такеда***

Изучено спонтанное излучение и оптическое усиление в эпитаксиальных слоях GaAs, легированных эрбием и кислородом и выращенных МОС-гидридным методом. Для получения высокой концентрации эрбия – до $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ – использованы оптимальные ростовые условия. Измерения методом Шапли – Лехени показали наличие оптического усиления ($\sim 45 \text{ см}^{-1}$) при сравнительно низкой интенсивности накачки ($\sim 0.1 \text{ кВт/см}^2$) и температуре 77 К.

Ключевые слова: полупроводники с редкоземельными примесями, вынужденное излучение, оптическое усиление.

Полупроводниковые структуры с редкоземельными примесями представляют большой интерес с точки зрения их возможных лазерных применений. В [1, 2] сообщалось о создании на основе полупроводников, легированных эрбием, ИК излучателей, работающих в режиме спонтанного излучения в практически важном диапазоне $\sim 1.54 \text{ мкм}$ [1, 2]. Они спектрально согласуются с оптическими усилителями на волокне, легированном эрбием (EDFA), которые перекрывают наиболее удобное для дальней волоконно-оптической связи спектральное окно.

С точки зрения физики твердого тела эти структуры представляют собой интересный случай последовательного переноса энергии от электрической подсистемы на экситонные ловушки и затем на внутреннюю 4f-оболочку примесного иона Er^{3+} . Последний оказывается в возбужденном состоянии, в котором он способен испускать фотон за счет переходов внутри оболочки. В отличие от многих других излучательных центров в полупроводниках, в редкоземельных ионах энергия фотона почти нечувствительна к температуре, что приводит к стабильному согласованию длины волны излучения с линией передачи и фотоприемником.

В ряду лучших кандидатов для применения в ИК излучателях особняком стоит полупроводник типа Si или GaAs, совместно легированный эрбием и кислородом. Эта комбинация ведет к образованию центров $\text{Er}-2\text{O}$ [3–5]. В [3, 5, 6] показано, что интенсивность фотolumинесценции значительно выше, когда эпитаксиальный слой GaAs:Er,O выращен при оптимальных температуре и условиях легирования, благоприятных для формирования эффективных центров $\text{Er}-2\text{O}$. При этом максимальная концентрация данных центров увеличивается до $\sim 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Этот фактор важен для получения доста-

точного оптического усиления при инверсном заселении излучательных центров.

Другая серьезная проблема связана с безызлучательным опустошением возбужденных состояний иона Er. Этот механизм, преобладающий при более высокой температуре, является, по-видимому, рекомбинацией типа Оже с участием свободных носителей [7, 8].

В настоящей работе мы проводили спектральные исследования GaAs:Er,O с точки зрения возможных лазерных применений. При измерениях оптического усиления нам удалось получить свидетельство о наличии вынужденного излучения. Насколько нам известно, это первое экспериментальное наблюдение вынужденного излучения в GaAs, легированном редкоземельными примесями.

Для выращивания GaAs, легированного эрбием на подложке (001) GaAs, использован МОС-гидридный метод газофазной эпитаксии при низком давлении. Источниками материала для роста служили TEGa и TВаs, для легирования – $\text{Er}(\text{C}_{11}\text{H}_{19}\text{O}_2)_3$ (как источник эрбия), содержащий 6 атомов кислорода на молекулу с одним атомом эрбия. Следовательно, он обеспечивает одновременное легирование полупроводника ионами Er и O. Однако в работах [3, 5] было указано, что для оптимизации легирования необходимо дополнительное введение кислорода в газовый поток.

Высокая концентрация эрбия ($8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) была достигнута при содержании кислорода, достаточном для образования люминесцентных центров $\text{Er}-2\text{O}$. В [6] было показано, что имеется пороговая температура роста (около 585°C), выше которой образование центров $\text{Er}-2\text{O}$ сильно подавляется. Рост производился при 543°C . Для этих экспериментов были приготовлены две структуры, соответствующие данные о которых приведены в табл.1.

Табл.1. Параметры эпитаксиальных структур, использованных в данной работе: одиночные слои GaAs:Er,O на GaAs-подложке.

Номер структуры	Толщина слоя, легированного Er (нм)	Концентрация Er (см^{-3})*
4408	160	$8 \cdot 10^{18}$
4215	770	$7 \cdot 10^{18}$

*По данным масс-спектропии вторичных ионов.

*Физический институт им. П.Н.Лебедева, РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; (адрес в настоящее время: Center for High Technology Materials, UNM, Albuquerque, NM; e-mail: eliseev@chtm.anm.edu)

**Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Россия, 194021 С.Петербург, Политехническая ул. 26

***A.Koizumi, Y.Fujiwara, Y.Takeda. Nagoya University, Nagoya, Japan

Исследования фотолюминесценции проводились при 4.2 и 77 К при возбуждении непрерывным Ar-лазером с интенсивностью накачки до 1 кВт/см². Излучение образцов анализировалось с помощью 0.91-метрового решеточного монохроматора и детектировалось германиевым рpn-фотодиодом, охлаждаемым жидким азотом, с использованием прерывателя и синхронного усилителя. Спектральное разрешение варьировалось от 0.04 до 0.3 нм.

Поскольку ширина полосы спонтанного излучения в главной линии очень мала (~0.04 нм при 4.2 К), для лазерных опытов требуется точная настройка резонатора на эту линию. Чтобы уменьшить межмодовое расстояние до вышеупомянутой ширины линии, длина резонатора должна превышать ~1 см. Для измерения усиления мы использовали метод Шапли – Лехени [9], который не требует резонатора. Усиленное спонтанное излучение (УСИ) измеряется на одном сколоте торца образца.

Освещаемое пятно имеет форму полоски, длина которой на образце изменяется от нуля до L . Интенсивность УСИ зависит от длины полоски как

$$P_{\text{ase}}(L) = P_0[\exp(gL) - 1], \quad (1)$$

где P_0 – константа; g – действующее модовое усиление. Когда усиления нет, интенсивность спонтанного излучения растет с ростом L линейно вследствие увеличения возбуждаемого объема.

Заметим, что при малом усилении формула (1) также дает линейный рост ($P_{\text{ase}} \sim gL$). Следовательно, имеется трудность в идентификации слабого усиленного излучения, которое можно спутать с простым спонтанным излучением. Усиленное излучение можно определить подгонкой выражения (1) под экспериментальную зависимость интенсивности УСИ, если она отличается от линейной функции.

Другая методическая трудность состоит в том, что край освещаемого пятна должен быть резким. Если край размыт, его прямоугольная форма будет влиять на зависимость интенсивности УСИ от L . Это важно при измерении большого усиления, для чего требуются малые длины L . В нашем случае ожидаемое усиление невелико, так что начальная часть зависимости $P_{\text{ase}}(L)$ не используется.

В наших опытах осуществлялась накачка непрерывным аргоновым лазером на $\lambda = 515$ нм. Длина освещаемого пятна составляла до ~1 мм, ширина была равна 0.2 мм, тогда как размер образца составлял 5 мм. Измерения усиления были выполнены при температуре 77 К.

Излучение, относящееся к ионам эрбия, наблюдается в интервале 1538 – 1650 нм в виде серии узких линий, причем примерно 0.8 всей мощности выходит в сильнейшую линию 1538.1 нм (рис.1). Обычно эта мощность растет сублинейно с накачкой, что свидетельствует о тенденции к насыщению, связанной с заполнением верхнего уровня иона Er. Измеренная интенсивность излучения от торца образца на длине волны 1538 нм является суммой P_{ase} и фоновой спонтанной фотолюминесценции P^* , обусловленной накачкой рассеянным излучением. Мы измеряем P^* как сигнал, который наблюдается, когда L приближается к нулю, и вычитаем этот сигнал из измеряемой интенсивности. Оставшаяся часть интенсивности принимается равной P_{ase} , и эта величина отложена как функция длины полоски L (рис.2). Кривые показаны для образцов из двух пластин при наибольшей интенсивности

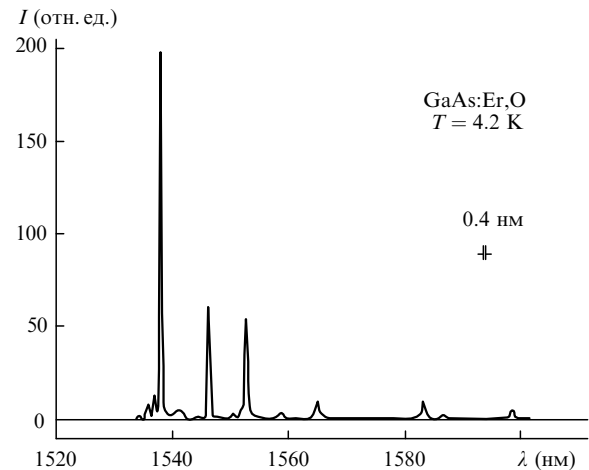


Рис.1. Спектр спонтанного излучения центров Er-2O в GaAs при 4.2 К и возбуждении непрерывным аргоновым лазером (515 нм).

ти накачки. Они приближенно рассчитаны согласно выражению (1) с усилением как подгоночным параметром. Сплошные кривые соответствуют $g = 8$ см⁻¹ в образце № 4408 и $g = 45$ см⁻¹ в образце № 4215. При меньшей интенсивности накачки зависимость более близка к линейной, что свидетельствует о несущественном усилении. При больших длинах L интенсивность не растет, вероятно вследствие насыщения усиления.

Таким образом, мы впервые наблюдали вынужденное излучение в структуре на GaAs:Er,O при температуре 77 К и интенсивности накачки выше 0.1 кВт/см², а именно, модовое усиление 45 см⁻¹ могло быть выведено при длине освещенной полоски до 0.5 мм. Порог инверсии превышался при интенсивности накачки ~0.1 кВт/см². Различие двух образцов может быть связано с толщиной слоя GaAs, легированного эрбием: она больше в образце № 4215, чем в образце № 4408, следовательно, в образце № 4215 создается большее модовое усиление.

По сравнению с другими полупроводниками, легированными Er, в данных образцах порог инверсии оказывается очень низким. В работе [10] для достижения режима вынужденного излучения в нанокристаллических волно-

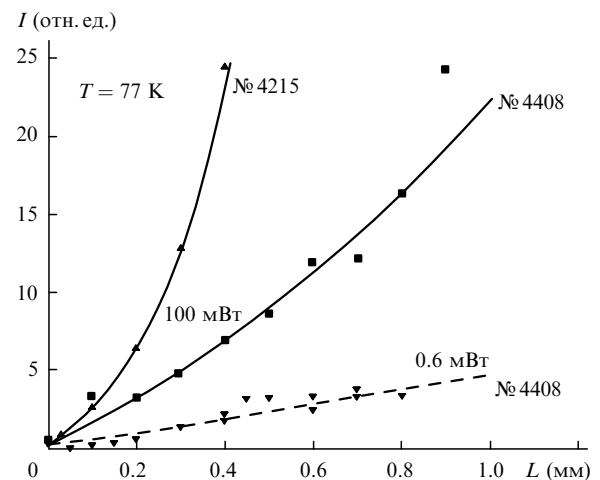


Рис.2. Зависимости интенсивности усиленного спонтанного излучения от длины освещаемой полоски на образце при температуре 77 К, возбуждении непрерывным аргоновым лазером (515 нм) и полной мощности накачки 100 мВт (сплошные кривые; коэффициент усиления $g = 45$ и 8 см⁻¹ для образцов № 4215 и 4408 соответственно), а также при полной мощности накачки 0.6 мВт (штриховая кривая).

водах на базе кремния, легированного эрбием, использована интенсивность накачки $7-10$ МВт/см². Вынужденное излучение наблюдалось также в аморфном Si, легированном Er [11], при интенсивности накачки 200 кВт/см². Причинами более высокого порога может быть более высокая концентрация эрбия в нанокристаллическом Si ($\sim 10^{20}$ см⁻³) и в аморфном Si ($\sim 2.5 \cdot 10^{20}$ см⁻³), возбуждение короткими импульсами (по сравнению с большим временем жизни рабочего состояния иона Er) и проведение опыта при комнатной температуре.

В заключение отметим, что полоса фотолюминесценции GaAs, легированного Er и O, расположенная около 1538 нм, оказалась очень узкой. Оптическое усиление ~ 45 см⁻¹ было получено при температуре 77 К и непрерывной накачке Ar-лазером с интенсивностью излучения около 0.1 кВт/см². Таким образом, вынужденное излучение достигается, по крайней мере, при низкой температуре. Это означает, что противодействующий оже-механизм дезактивации центров Er,O не препятствует получению в них инверсной населенности.

1. Ennen H., Schneider J., Pomrenke G., Axmann A. *Appl.Phys.Letts*, **43**, 943 (1983).
2. Whitney P.S., Uwai K., Nakagome H., Takahei K. *Electron.Letts*, **24**, 740 (1988).
3. Takahei K., Taguchi A. *J.Appl.Phys.*, **74**, 1979 (1993).
4. Takahei K., Taguchi A., Horikoshi Y., Nakata J. *J.Appl.Phys.*, **76**, 4332 (1994).
5. Fujiwara Y., Kawamoto T., Koide T., Takeda Y. *Physica B, Cond. Matt.*, **273**, 770 (1999).
6. Fujiwara Y., Matsubara N., Tsuchiya J., Ito T., Takeda Y. *Jpn.J. Appl.Phys.*, **36**, 2587 (1997).
7. Benton J.L., Eaglesham D.L., Aimonte M., Citrin P.H., Marcus M.A., Adler D.L., Jacobson D.C., Poate M. *MRS Symp.Proc.* (Pittsburg, USA, Material Research Soc., 1993, vol. 301, p. 181).
8. Culp T.D., Cederberg J.G., Bieg B., Kuech T.F., Bray K.L., Pfeiffer D., Winter C.H. *J.Appl.Phys.*, **83**, 4918 (1998).
9. Shaklee K.L., Leheny R.F. *Appl.Phys.Letts*, **18**, 475 (1971).
10. Zhao X., Komuro S., Isshiki H., Aoyagi Y., Sugano T. *Appl.Phys. Letts*, **74**, 120 (1999).
11. Bresler M.S., Gusev O.B., Terukov E.I., Yassievich I.N., Zakharchenya B.P., Emel'yanov V.I., Kamenev B.V., Kashkarov P.K., Konstantinova E.A., Timoshenko V.Yu. *SPIE Symp. Photonics West* (San Jose, CA, 2001, pap. 4282-33).