

РЕЗОНАНСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ Nd^{3+} В МОНОКРИСТАЛЛЕ ПОЛУПРОВОДНИКА Gd_2S_3

*М.В.Глушков, А.А.Мамедов, А.М.Прохоров,
Ж.А.Пухлий, И.А.Щербаков*

Впервые наблюдалась люминесценция ионов Nd^{3+} в монокристалле полупроводника Cd_2S_3 при резонансном лазерном возбуждении. Показано, что в полупроводниках типа $A_2^{III}B_3^{VI}$, активированных трехвалентными ионами редкоземельных элементов, возможно реализовать механизм ударного возбуждения примесных центров носителями в электрическом поле.

Трехвалентные ионы редкоземельных элементов (TR^{3+}) и, в частности, ионы Nd^{3+} являются самой распространенной активаторной примесью в лазерных диэлектрических кристаллах и стеклах. Внедрение TR^{3+} ионов в полупроводниковые монокристаллы, например, на основе соединений $A_2^{III}B_3^{VI}$ открывает возможности создания нового класса актив-

ных элементов лазеров. Несмотря на то, что полупроводниковые монокристаллы, активированные TR^{3+} ионами, с этой точки зрения практически не изучены, можно предположить две новые возможности возбуждения генерации на этих ионах в полупроводниках. В случае реализации этих возможностей открываются перспективы использования полупроводников, активированных TR^{3+} ионами, в квантовой электронике, интегральной оптике, системах оптической связи. Речь идет об оптическом возбуждении полупроводника на переходе зона — зона с последующей передачей энергии электронного возбуждения активной примеси и об ударном возбуждении примесных центров носителями тока в электрическом поле [1]. Выяснение возможности реализации новых способов возбуждения требует предварительного исследования спектрально-люминесцентных свойств TR^{3+} ионов в полупроводниковых монокристаллах. В настоящей работе мы сообщаем о резонансном оптическом возбуждении ионов неодима в монокристалле Gd_2S_3 . Одна из кристаллических модификаций этого соединения, α - Gd_2S_3 , имеет орторомбическую структуру, в которой Gd находится в двух неэквивалентных позициях, и является полупроводником с шириной запрещенной зоны $\sim 2,2 - 2,5$ эВ [2].

В данной работе были исследованы спектры поглощения α - Gd_2S_3 :Nd и спектры излучения ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ иона Nd^{3+} с помощью метода резонансного лазерного возбуждения, описанного в работе [3], при различных температурах. Концентрация неодима в Gd_2S_3 составляла 1 вес. %.

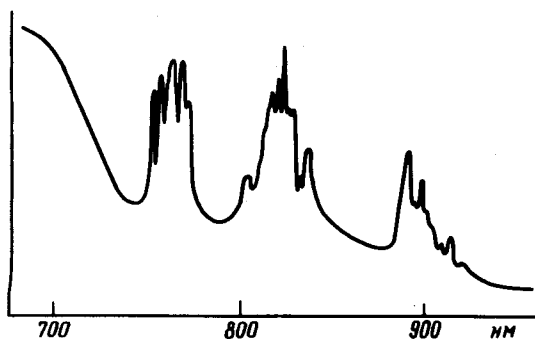


Рис. 1. Спектр поглощения Gd_2S_3 :Nd при 300 K

На рис. 1 приведен спектр поглощения Gd_2S_3 :Nd, записанный при 300K. В спектре наблюдаются три группы интенсивных линий в районе длин волн 900, 820, 760 нм, характерных для переходов внутри 4f оболочки из основного ${}^4I_{9/2}$ на возбужденные состояния ${}^4F_{3/2}$, ${}^4F_{5/2}$, ${}^2H_{9/2}$, ${}^4F_{7/2}$, ${}^4S_{3/2}$ иона Nd^{3+} . В районе длин волн короче 730 нм — область собственного поглощения Gd_2S_3 . На рис. 2 и рис. 3 представлены резонансные спектры излучения иона Nd^{3+} в Gd_2S_3 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, записанные при 300 и 4,2K соответственно. Здесь же, под осью абсцисс, на каждом из рисунков приведены спектры поглощения на переходе ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$ иона Nd^{3+} в Gd_2S_3 . Длина волны возбуждающего света, 888,8 нм, соответствует максимуму самой коротковолновой линии в спектре поглощения на этом переходе, что обеспечивает возбуждение верхней штарковской компоненты метастабильного состояния ${}^4F_{3/2}$. Из приведенных спектров видно, что число линий при низкой температуре превышает теоретически максимально возможное для перехода между сос-

тояниями с заданными квантовыми числами J . При гелиевой температуре в оптических спектрах резонансного перехода неодима наблюдаются две четко выраженные системы линий. Особенно это хорошо видно в спектре поглощения при 4,2К. Присутствие четырех линий в спектре поглощения ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$ при 4,2К свидетельствует о том, что ионы Nd^{3+} изоморфно замещают ионы Gd^{3+} в обоих неэквивалентных положениях последних.

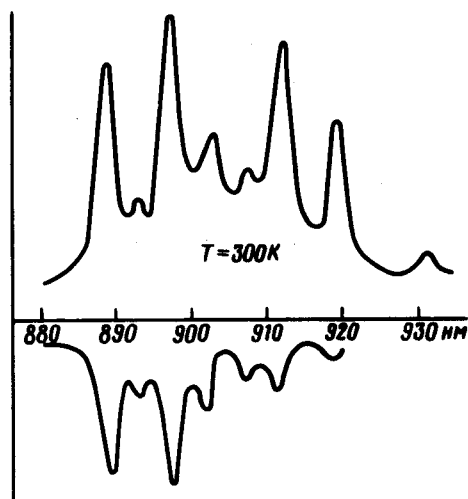


Рис. 2. Спектры люминесценции и поглощения Nd^{3+} в Gd_2S_3 при 300 К

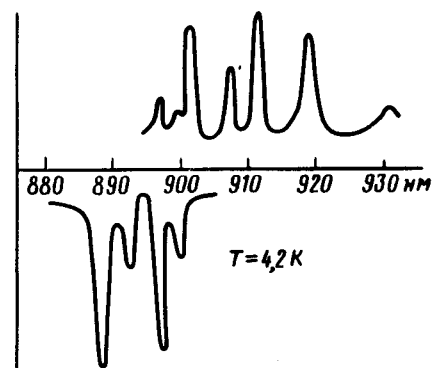


Рис. 3. Спектры поглощения и люминесценции Nd^{3+} в Gd_2S_3 при 4,2 К

Исследование кинетики излучения на резонансном переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ при возбуждении на длине волны 888,8 нм показало, что она описывается экспонентой с характерным для ионов Nd^{3+} временем жизни ~ 37 мксек.

При оптическом возбуждении в зону, проведенном при 300К, люминесценции не наблюдалось. Это свидетельствует о большой величине вероятности релаксационных переходов зона — зона при комнатной температуре и не дает возможности реализовать механизм оптического возбуждения через зону ионов Nd^{3+} в $\alpha\text{-Gd}_2\text{S}_3$ [4]. С другой стороны наши результаты показывают, что ион неодима входит в $\alpha\text{-Gd}_2\text{S}_3$ как изоэлектронная примесь и может быть введен в полупроводниковые кристаллы $\text{A}_2^{\text{III}}\text{B}_3^{\text{VI}}$ в достаточно высоких концентрациях. При этом наблюдается его интенсивная люминесценция с $\tau = 37$ мксек. Это озна-

чает; что в таком типе полупроводников, легированных TR^{3+} ионами, ударный механизм возбуждения электролюминесценции может быть весьма эффективным [5, 6], и в перспективе на их основе можно получить активные структуры, инверсная населенность в которых создается ударным возбуждением ионов примеси свободными носителями, ускоренными приложенным электрическим полем [1]. Для их реализации необходимо выполнение некоторых требований, определяющихся особенностями ударного механизма возбуждения примесных центров. Первым таким условием является достаточно высокая концентрация активных примесных центров. Образование твердых растворов в системе $\text{Gd}_2\text{S}_3 - \text{Nd}_2\text{S}_3$ свидетельствует о том, что это требование в нашем случае возможно выполнить. Второе требование состоит в том, что энергия возбуждения примесного центра E_B должна быть меньше ширины запрещенной зоны E_g . В противном случае будет преобладать возбуждение свободных носителей, что приведет к пробое полупроводника. Для $\text{Gd}_2\text{S}_3 : \text{Nd}$ $E_B = 1,4$ эВ и $E_g = 2,2$ эВ. Это значение E_g определено по температурной зависимости электропроводности, оптические измерения дают величину 2,55 эВ [2]. Для получения высокой плотности возбужденных примесных центров необходимо также, чтобы время жизни их возбужденного состояния τ существенно превышало время τ_H , в течение которого носитель, ускоряемый полем, приобретает энергию, достаточную для возбуждения примесного центра. Измеренное нами значение $\tau \approx 3,7 \cdot 10^{-5}$ сек существенно превышает характерные времена τ_H , составляющие обычно величину порядка 10^{-12} сек [1].

Таким образом, наши результаты показывают, что в полупроводниках типа $A_2^{\text{III}}B_3^{\text{VI}}$, активированных трехвалентными ионами редкоземельных элементов, возможно эффективное ударное возбуждение примесных центров носителями в электрическом поле, и эти материалы могут служить активной средой лазера нового типа.

В заключение авторы выражают глубокую признательность доктору Г.Хуберу и доктору М.Лаису за предоставление кристаллов для исследования и В.В.Осико за интерес к работе и обсуждение результатов.

Физический институт П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
24 ноября 1979 г.

Литература

- [1] Н.А.Власенко, Ж.А.Пухлий. Письма в ЖЭТФ, 14, 449, 1971; "Квантовая электроника", республиканский межведомственный сборник, вып. 10, стр. 3, "Наукова думка", Киев, 1976.
- [2] Физические свойства халькогенидов редкоземельных элементов, Л., изд. Наука, 1973.
- [3] М.В.Глушков, Ю.В.Косичкин, В.В.Осико, Ж.А.Пухлий, И.А.Щербаков. Квантовая электроника, 6, 2215, 1979.
- [4] M. Leiss. J. Phys. C., 1980 (в печати).
- [5] В.В.Осико. Сб. статей "Оптика и спектроскопия", т. 1, стр. 249, М.—Л., 1963.
- [6] И.К.Верещагин. Электролюминесценция кристаллов, М., изд. Наука, 1974.