

## ИНДУЦИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ $Y_3Al_5O_{12} - (Nd)^{3+}$ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

✠ Ю.К.Воронько, Э.Л.Нолле, В.В.Осико, М.Н.Тимошечкин

Применение импульсов электронов с энергией несколько десятков килоэлектронвольт для возбуждения полупроводников [1] позволило получить вынужденное излучение с энергией квантов близкой к ширине запрещенной зоны и с КПД около 30%. Большой интерес, с нашей точки зрения, представляет получение генерации при электронном возбуждении примесных ионных кристаллов. Эти материалы обладают широким набором частот излучения в видимой и ультрафиолетовой областях спектра и, кроме того, линиями излучения значительно более узкими, чем у полупроводников. Хотя катодолюминесценция активированных ионных веществ (например, рубина [2, 3]) исследуется уже в течение нескольких десятилетий, нам неизвестны сообщения о получении индуцированного излучения этих материалов.

Между оптическим возбуждением, которое применяется для генерации излучения примесными ионами в ионных кристаллах, и электронным возбуждением имеется принципиальное различие. При оптической накачке непосредственно возбуждаются электронные оболочки ионов активатора, тогда как при электронной накачке первоначально создаются электронно-дырочные пары в разрешен-

ных зонах ионного кристалла, и лишь затем их энергия передается ионам активатора. Для выяснения эффективности накачки ионных кристаллов электронным пучком был определен с помощью фотоэлементов Ф4 и Ф5 по методике, описанной в [4], энергетический (отношение мощности излучения, возникающего в образце, к мощности электронного пучка) и квантовый (отношение числа испущенных фотонов ионами активатора к числу электронно-дырочных пар, созданных пучком) выходы излучения монокристаллов  $Y_3Al_5O_{12}-(Nd)^{3+}$  (0,3 вес%). Кристаллы выращены из расплава по методу Чокральского. Возбуждение производилось импульсами электронов длительностью  $t_u = (0,1 + 14)$  мксек, энергией 90 кэв и частотой 10 кГц. Энергия образования электронно-дырочных пар принималась равной 20 эв, так как ширина запрещенной зоны в  $Y_3Al_5O_{12}$  равна 6,5 эв. При электронном возбуждении помимо инфракрасного спектра, возникающего при оптическом возбуждении и обусловленного переходами с уровня  ${}^4F_{3/2}$  (рис. 1, а), появляются интенсивные линии излучения, которые ранее наблюдались [5] при рентгеновском возбуждении и объясняются переходами с

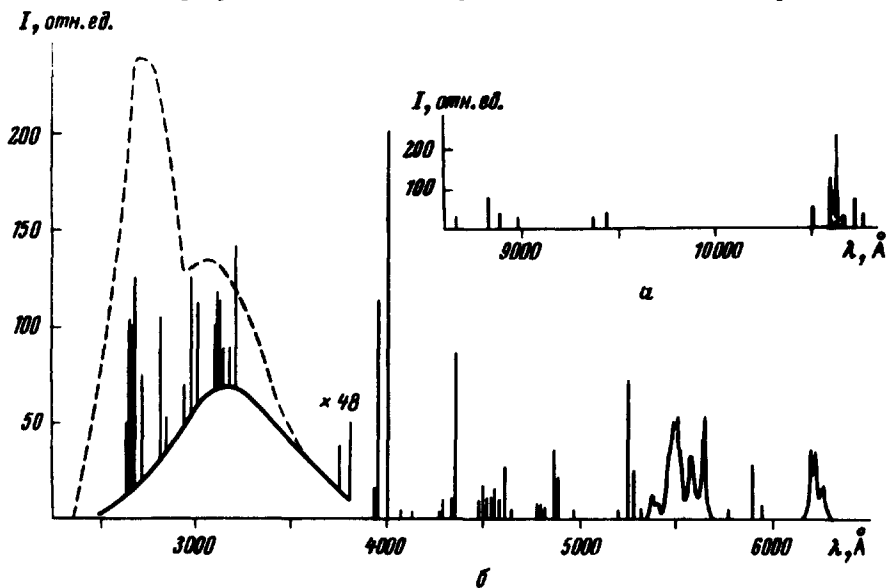


Рис.1. Спектр излучения при 293 и 80°K (штриховая линия). Прямыми отмечены линии излучения с  $\Delta < 25$  Å

верхнего уровня  $S^1$ ) ионов неодима (рис. 1, б). Наиболее интенсивными являются линии с максимумом при  $\lambda_M = 4007, 4358$  и  $5250$  Å с шириной  $\Delta = 7 + 8$  Å. Спад интенсивности излучения для всех линий, представленных на рис. 1, б, происходил по экспоненте с постоянной  $\tau_S = 3,5 \pm 0,3$  мксек, свидетельствуя, что эти линии обусловлены электронными переходами с одного уровня. Время жизни уровня  ${}^4F_{3/2}$  равно  $\tau_F = 180 \pm 10$  мксек. В ультрафиолетовой части спектра наблюдалась широкая полоса излучения с максимумом 3170 Å,  $\Delta = 700$  Å и  $\tau < 1$  мксек, (293 °K), которая связана с электронными переходами кристаллической решетки граната или ее дефектов. При понижении температуры от

<sup>1)</sup> Условное обозначение одного из высоких уровней  $(Nd)^{3+}$ , данное Дики [6].

комнатной до  $80^\circ\text{K}$ , интенсивность излучения  $(\text{Nd}^{3+})$  уменьшалась в 4 раза, тогда как интенсивность собственного излучения граната увеличивалась, и вблизи края основной полосы поглощения появлялась еще одна полоса излучения с максимумом  $2730 \text{ \AA}$  и  $\Delta = 400 \text{ \AA}$ .

При  $293^\circ\text{K}$  энергетический ( $\eta$ ) и квантовый ( $\gamma$ ) выходы излучения составляли для спектральных областей  $0,39 + 0,5 \text{ мк}$ :  $\eta_1 = 2,5 \pm 0,7\%$ ,  $\gamma_1 = 0,18 \pm 0,05$ ; для области  $0,5 + 0,63 \text{ мк}$ :  $\eta_2 = 4 \pm 1\%$ ,  $\gamma_2 = 0,35 \pm 0,1$  и для области  $0,86 + 1,1 \text{ мк}$ :  $\eta_3 = 4 \pm 1\%$ ,  $\gamma_3 = 0,7 \pm 0,2$ . Из этих измерений следует, что квантовый выход для электронных переходов с уровня  $S$  ионов неодима  $\gamma_3 = 0,53 \pm 0,17$  и в пределах ошибки измерений равен величине  $\gamma_F$  для переходов с уровня  ${}^4F_{3/2}$ . Относительно большую величину  $\gamma$  можно объяснить, если предположить, что электронно-дырочные пары, созданные электронным пучком, связываются в экситоны типа Френкеля, которые диффундируют к ионам неодима и возбуждают их путем обменно-резонансного взаимодействия. Возможно, что полоса излучения с максимумом  $2730 \text{ \AA}$  обусловлена аннигиляцией экситонов. Интенсивность излучения ионами неодима ( $I$ ) при  $293^\circ\text{K}$  увеличивалась вначале линейно с ростом плотности тока  $j$  от  $10^{-3} \text{ а/см}^2$  до  $10^{-1} \text{ а/см}^2$ , а при  $j \approx 1 \text{ а/см}^2$  слабо зависела от  $j$ , что связано с возбуждением большей части ионов неодима. Так как для  $j = 1 \text{ а/см}^2$  скорость генерации пар  $g = 10^{25} \text{ пар/см}^3 \cdot \text{сек}$ , то при этом число возбужденных ионов неодима  $\Delta N = g\tau_S \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , что близко к концентрации  $\text{Nd}^{3+}$  в кристалле. Исследование при  $293^\circ\text{K}$  излучения резонаторов длиной  $2 \text{ мм}$  показали, что при нанесении на их торцы серебряных покрытий с коэффициентом отражения  $97\%$ , наблюдается сужение диаграммы направленности излучения с торца резонатора от  $30$  до  $10^\circ$  для излучения с  $\lambda_M = 10637 \text{ \AA}$ ,

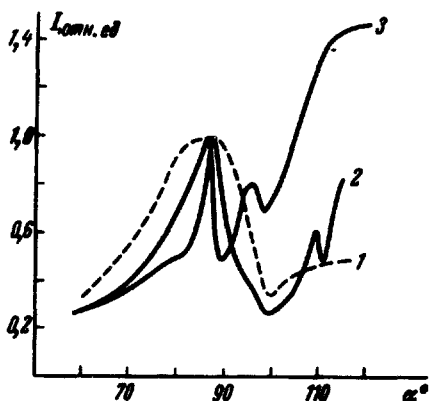


Рис.2. Зависимость интенсивности излучения  $I$  от угла  $\alpha$  к плоскости торца резонатора при  $293^\circ\text{K}$ : 1 — непосеребрянные торцы,  $\lambda_M = 10637$  и  $4007 \text{ \AA}$ ; торцы с  $R = 97\%$ ; 2 — для  $\lambda_M = 10637 \text{ \AA}$ ; 3 — для  $\lambda_M = 4007 \text{ \AA}$

соответствующего переходу  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ , и до  $15^\circ$  для излучения с  $\lambda_M = 4007 \text{ \AA}$ , соответствующего переходу  $S \rightarrow {}^4F_{7/2}$  (рис. 2). При этом для переходов  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  происходило сужение линии излучения от  $20$  до  $7 \text{ \AA}$  (рис. 3). Сужение диаграмм направленности и линий излучения при серебрении торцов резонаторов свидетельствует об индуцированном излучении. Вынужденный характер излучательных переходов подтверждается также тем, что интенсивность излучения в направлении, близком к нормали плоскости посеребрянных торцов резонатора с  $R = 97\%$  уменьшается лишь в 2 раза по сравнению с интенсивностью излучения с передней непосеребрянной грани резонатора, тогда как при отсутствии вынужденного излучения, интенсивность излучения с торцов должна быть примерно в 30 раз меньше интенсивности излучения с передней грани.

При уменьшении  $j$  от 0,2 до  $10^{-2}$  а/см<sup>2</sup> диаграмма направленности не менялась, а интенсивность излучения уменьшалась линейно с  $j$ , из чего следует, что порог вынужденного излучения находится при плотностях тока электронов  $j < 10^{-2}$  а/см<sup>2</sup>. Результаты исследований показали, что с помощью электронного возбуждения можно, по-видимому, создать ОКГ на основе  $Y_3Al_5O_{12}(Nd^{3+})$  не только в инфракрасном диапазоне, но также в области видимого спектра

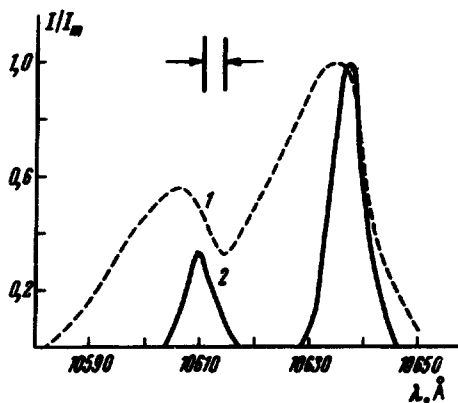


Рис.3. Спектр излучения при 293°K и  $j = 0,2$  а/см<sup>2</sup>: 1 — с передней стороне резонатора с непосеребренными торцами, 2 — с посеребренного торца резонатора

при переходах с уровня 5. Представляет интерес возбуждение электронным пучком кристаллов граната, активированных другими ионами, например гадолинием, что может позволить получить вынужденное излучение в ультрафиолетовой области с КПД около 20%.

Авторы выражают благодарность А.М.Прохорову и В.С.Вавилову за постоянное внимание к работе и обсуждение результатов.

Физический институт  
им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
15 декабря 1970 г.

### Литература

- [1] Н.Г.Басов, О.В.Богданкевич, А.Г.Девятков. ДАН СССР, 155, 783, 1964.
- [2] E.W.Mitchell, P.D.Townsend. Proc. Phys. Soc., 81, 12, 1963.
- [3] Ю.В.Воронов, Ю.П.Тимофеев. Журнал прикладной спектроскопии, 2, 126, 1965.
- [4] В.С.Вавилов, Э.Л.Нолле, С.Н.Максимовский. ФТТ, 7, 1558, 1965.
- [5] Ю.К.Воронько, Б.И.Денкер, В.В.Осико, А.М.Прохоров, М.И. Тимошечкин. ДАН СССР, 188, 1258, 1969.
- [6] G.H.Dicke, H.M.Crosswhite. Appl. Optics, 2, 675, 1963.