

ФОНОННЫЕ ПОВТОРЕНИЯ РЕКОМБИНАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ЖИДКОСТИ В ZnO

Л.Ф. Гудыменко, Е.Г. Гуле, М.П. Лисица,
А.М. Яремко

Исследована температурная зависимость рекомбинационного излучения (РИ) монокристаллов ZnO при высоких уровнях возбуждения. В температурном интервале 4,2 – 70К впервые наблюдались $2LO$ - и $3LO$ -фононные повторения полосы излучения электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ).

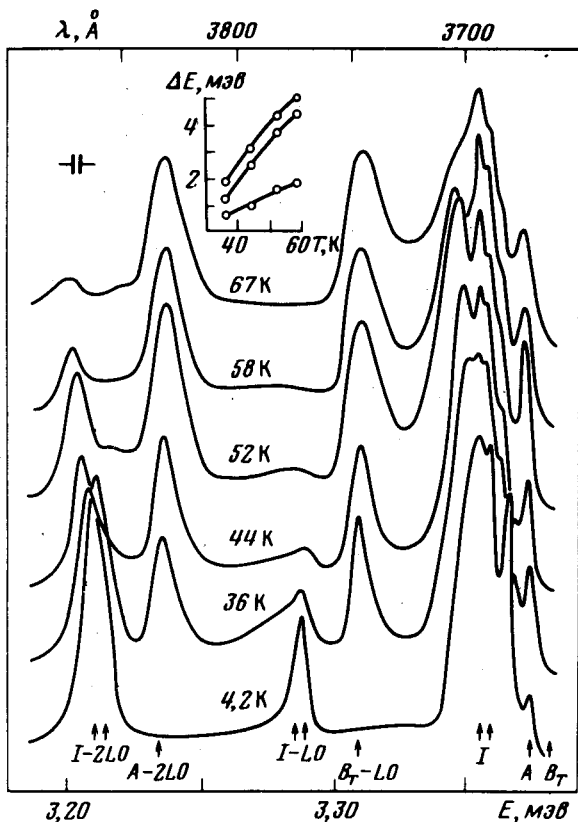
Известно, что спектр РИ монокристаллов ZnO при температуре 4,2К состоит из линий свободных и связанных экситонов и их фононных повторений [1]. При 77К в спектре остаются только линии свободных экситонов и их фононных повторений [2 – 4].

При высоких уровнях возбуждения и температуре 4,2К на линии связанного экситона накладывается полоса электронно-дырочной плазмы (ЭДП). Представляют интерес исследования температурного поведения спектра люминесценции ZnO при таких уровнях возбуждения. Их результатом должно быть установление температурных интервалов проявления различных каналов рекомбинации.

Спектры РИ монокристаллов ZnO (рисунок) получены на спектрографе PGS-2 при возбуждении азотным лазером ЛГИ-21. Частоты (энергии) связанных экситонов обозначены символом I , свободных – A и B_T . Как видно из рисунка при 4,2К спектр люминесценции определяют полосы $I - mLO$ -фононных повторений связанного экситона. При возрастании температуры до 50К они практически исчезают, а почти незаметные при 4,2К полосы фононных повторений $B_T - LO$ и $A - 2LO$ свободных экситонов усиливаются.

Излучение ЭДП при 4,2К сосредоточено в области спектра 369 – 369,5 нм. Если исследовать свечение достаточно чистых участков образцов, то при уровне возбуждения, обеспечивающем концентрацию носителей $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$, в спектре РИ возникает полоса, максимум излучения которой при 4,2К расположен при 369;5 нм (с низкоэнергетической стороны от линий связанного экситона I). С ростом температуры эта полоса смещается в область меньших энергий. Температурный ход этого смещения представлен верхней кривой вставки рисунка. Спектральное положение при 4,2К и температурный интервал (до 70К) существования этой полосы позволяют отождествить ее с полосой излучения прямой рекомбинации ЭДЖ [5]. Как видно из рисунка температурная зависимость положения полосы РИ ЭДЖ отличается от таковой для непрямозонных полупроводников, например, для Si [6]. Это связано с тем, что в прямозонных полупроводниках существование ЭДЖ обусловлено сильным $e-h$ фононным взаимодействием [7, 8]. В соответствии с [7], для ЭДЖ в полупроводниках с ионной связью при сравнительно низких плотнос-

тях носителей понижение энергии возникает за счет поляронного эффекта. При повышении плотности ЭДЖ поляронный вклад несколько ослабевает. Поскольку при увеличении температуры в соответствии с фазовой диаграммой [9] плотность ЭДЖ уменьшается, энергия связи ЭДЖ, согласно [7] должна возрастать, а энергия кванта РИ уменьшается, что и наблюдается в эксперименте.



Зависимость спектров РИ ZnO от температуры. На вставке: температурное смещение полосы РИ ЭДЖ и ее 2-LO-фононного повторения – верхняя и средняя кривые соответственно, нижняя – смещение экситонных полос. (Сдвиг ΔE отсчитывается от произвольно фиксированных точек на шкале энергий)

Особый интерес представляет полоса, которая при $T \sim 10 - 20$ К появляется на длинноволновом краю полосы $I - 2LO$ -фононного повторения связанного экситона (3,2094 эВ). С ростом температуры она смещается в область меньших энергий (рисунок) и при 70 К исчезает. По своему температурному поведению (средняя кривая вставки рисунка) эта полоса не может быть интерпретирована как результат взаимодействия связанного экситона с LO-фононами (температурное смещение экситонных полос приведено на нижней кривой вставки рисунка). Ее температурное смещение коррелирует только с поведением полосы, отождествленной выше с излучением ЭДЖ. Во всем температурном интервале существования описываемой полосы и полосы РИ ЭДЖ между ними сохраняется постоянное расстояние – 144 мэВ, равное энергии двух LO-фононов. Температура исчезновения ее (70К) соответствует критической температуре ЭДЖ в монокристаллах ZnO [5].

Все это заставляет предположить, что данная полоса является 2 – *LO*-фононным повторением РИ ЭДЖ.

Отметим, что 1 – *LO*-фононное повторение полосы РИ ЭДЖ не наблюдается. Этот факт хорошо согласуется с результатами работы [10], где было показано, что в чистых кристаллах 1 – *LO*-фононное повторение излучения экситона или рекомбинации электронно-дырочной пары является слабым, и только в кристаллах, содержащих достаточное количество примесей, его интенсивность становится заметной.

В заключение отметим, что на длинноволновом краю полосы 3 – *LO*-фононного повторения связанного экситона также наблюдается полоса, поведение которой с изменением температуры совершенно аналогично только что описанному. Это позволяет считать ее 3 – *LO*-фононным повторением РИ ЭДЖ. Интенсивность последней полосы, так же как и интенсивность 3 – *LO*-фононных повторений полос свободных и связанных экситонов значительно ниже таковой 1,2 – *LO*-полос.

Институт полупроводников
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
20 июля 1978 г.
После переработки
18 сентября 1978 г.

Литература

- [1] C.Klingshirn. P.S.S. (b), 71, 547, 1975.
- [2] R.L.Weiber, W.C.Tait. Phys. Rev., 166, 791, 1968.
- [3] А.Х.Абдуев, А.Д.Адуков, Б.М.Атаев, Р.А.Рабданов, Д.А.Шаихов.
Квантовая электроника, 5, 206, 1978.
- [4] I.Filinski, T.Scettrup. Sol. St. Comm., 6, 233, 1968.
- [5] I.Scettrup. Sol. St. Comm., 23, 741, 1977.
- [6] Jagdeep Shah, M.Combescot, A.H.Dayem. Phys. Rev. Lett., 38, 1497, 1977.
- [7] G.Beni, T.M.Rice. Phys. Rev. Lett., 37, 374, 1976.
- [8] Л.В.Келдыш, А.П.Силин. ЖЭТФ, 69, 1053, 1975.
- [9] R.F.Leheny. Jagdeep Shah. Phys. Rev. Lett., 38, 511, 1977.
- [10] A.A.Gogolin, E.I.Rashba. Sol. St. Comm., 19, 1177, 1976.