

ных скоплений и микродефектов *B*-типа и страт [10]: а) исследованные скопления, так же как и крупные скопления межузельных атомов углерода и кремния (*B*-дефекты, страты), имеют сопоставимые размеры масштаба сотен ангстрем, по крайней мере в одном измерении [10]; б) температура образования тех и других, по-видимому, близка к точке плавления кремния, поскольку их рассасывание происходит при $T \geq 1300$ °С при отсутствии влияния более низких температур на их размеры и концентрацию.

В то же время имеются свидетельства участия углерода в формировании *B*-дефектов: 1) пространственное распределение *B*-дефектов соответствует распределению примесей с коэффициентом сегрегации, меньшим единицы (углерод, кислород); 2) концентрация *B*-дефектов определенно связана с концентрацией углерода [10]; 3) отжиг при 1200 °С в течение 400 ч устраняет полосчатую неоднородность в распределении углерода (страты), в этом же режиме происходит отжиг *B*-дефектов [10].

Можно думать, что при охлаждении кристалла в процессе выращивания диапазон температур 1400—1300 °С проходит настолько быстро, что образовавшиеся при затвердевании скопления углерода не успевают раствориться, именно они и являются наблюдаемыми скоплениями, их последующие укрупнение и уплотнение приводят к образованию *B*-дефектов.

Список литературы

- [1] Inoue M., Teramoto I., Takayanagi S. // *J. Appl. Phys.* 1962. V. 38. N 8. P. 2578—2582.
- [2] Воронков В. В., Воронкова Г. И., Зубов В. В., Калинин В. П., Крынецкий В. В., Мурина Т. М., Прохорова А. М. // *ФТТ.* 1977. Т. 19. В. 6. С. 1774—1781.
- [3] Betnewitz I., Kolbesen B., Mayer K., Schuh G. // *Appl. Phys. Lett.* 1974. V. 25. N 5. P. 277—279.
- [4] Витман Р. В., Гусева Н. Б., Лебедев А. А. // *Письма ЖТФ.* 1984. Т. 10. В. 14. С. 837—839.
- [5] Баграев Н. Т., Власенко Л. С., Карпов Ю. А. // *ФТП.* 1981. Т. 15. В. 1. С. 82—85.
- [6] Витовский Н. А. // *ФТП.* 1982. Т. 16. В. 5. С. 882—885.
- [7] Витовский Н. А., Емельяненко О. В., Лагунова Т. С., Рахимов О. // *ФТП.* 1982. Т. 16. В. 6. С. 1122—1124.
- [8] Баграев Н. Т., Витовский Н. А., Власенко Л. С., Машовед Т. В., Рахимов О. // *ФТП.* 1983. Т. 17. В. 11. С. 1979—1984.
- [9] Рыбкин С. М. *Фотозлектрические явления в полупроводниках.* М., 1963. 490 с.
- [10] Рейви К. *Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии.* М., 1984. 475 с.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получено 30.05.1989
Принято к печати 9.06.1989

ФТП, том 23, вып. 11, 1989

КВАНТОВЫЙ ВЫХОД ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ИТТЕРБИЯ В ФОСФИДЕ ИНДИЯ

Васильев А. Э., Касаткин В. А., Савельев В. П.

В недавно опубликованной работе [1] было отмечено существенное различие спектров возбуждения люминесценции иона иттербия в фосфиде индия, снятых авторами [1] и приведенных в [2]. Это привело к тому, что в каждой работе предлагается альтернативная модель механизма возбуждения, объясняющая оригинальные спектры и ставящая под сомнение ранее полученные.

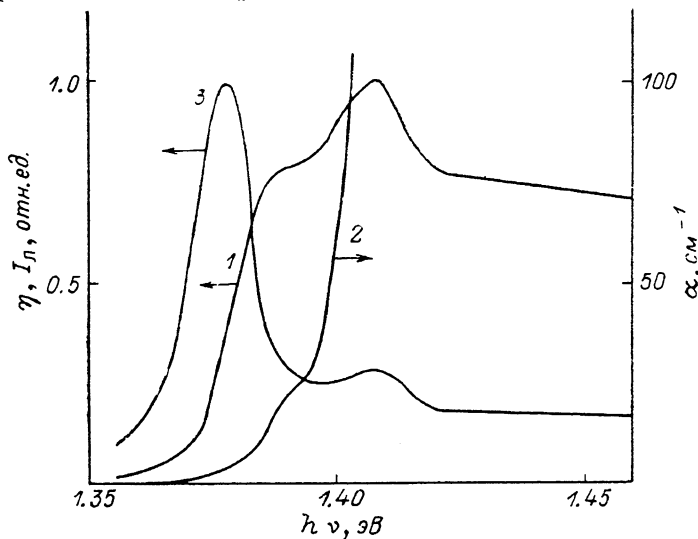
Анализируя экспериментальные результаты, опубликованные в [1–3], мы пришли к убеждению, что несоответствие обусловлено различием факторов, формирующих спектры возбуждения. Для примера рассмотрим влияние на спектр возбуждения люминесценции поглощения возбуждающего света кристаллом. Для простоты не будем учитывать интерференционные эффекты, так как

грани образцов не были точно плоскопараллельны, а их толщины были много больше длин волн возбуждающего излучения ($d \gg \lambda$). Решая задачу о поглощении света, учтем, что излучение центра люминесценции находится в области прозрачности кристалла. Регистрируемая интенсивность люминесценции связана с поглощенным излучением через квантовый выход люминесценции:

$$I_{\pi} = \frac{\eta I_0 (1 - R) [1 - \exp(-ad)]}{1 - R \exp(-ad)}, \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность падающего на поверхность образца света возбуждения, α и R — коэффициенты поглощения и отражения материала кристалла.

Как видно из выражения (1), спектр возбуждения люминесценции несет информацию не только о квантовом выходе η , но и о спектральной зависимости коэффициента поглощения и отражения возбуждающего света. Не последнюю роль играет и толщина образца d . При прочих равных условиях уже это затрудняет сравнение и интерпретацию спектров возбуждения люминесценции.



Спектры возбуждения люминесценции иона Yb^{3+} (1), поглощения кристалла $\text{InP}\langle\text{Yb}\rangle$ (2) и относительного квантового выхода люминесценции Yb^{3+} (3).

Толщина кристаллов $\text{InP}\langle\text{Yb}\rangle$ $d = 0.4$ мм, $N_D - N_A = (6 + 7) \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, $N_{\text{Yb}} = 2 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$.

Таким образом, более надежная информация о процессе возбуждения содержится только в спектральной зависимости квантового выхода люминесценции, которая может существенно отличаться от спектра возбуждения люминесценции.

Действительно, при возбуждении люминесценции в области прозрачности фосфида индия ($ad \ll 1$) светом с энергией $h\nu = 1.39$ эВ квантовый выход люминесценции пропорционален коэффициенту поглощения света α и толщине образца d : $1 - \exp(-ad) \approx ad$. В той же спектральной области коэффициент отражения практически не меняется и не превышает величины $R \leq 0.3$. В случае межзонного, экситонного или достаточно сильного примесного поглощения, где $ad > 1$, можно пренебречь экспонентой. При этом весь свет, попадающий в образец, поглощается, а спектр возбуждения люминесценции перестает зависеть от коэффициента поглощения. Следовательно, квантовый выход люминесценции существенно отличается от спектра возбуждения именно в спектральной области слабого или промежуточного поглощения. Правильность оценки иллюстрируют расчет и реальные спектры.

На рисунке представлена спектральная зависимость относительного квантового выхода люминесценции иона иттербия от энергии кванта возбуждающего света. Расчет производился по формуле (1) с учетом спектральной зависимости коэффициента поглощения α и спектра возбуждения люминесценции I_{π} , сняты при одной и той же температуре. Для сравнения они представлены на рисунке.

В спектре квантового выхода люминесценции иона иттербия при 18 К отчетливо наблюдается максимум с энергией $h\nu_m = 1.38$ эВ. Удалось установить, что энергетическое положение максимума не зависит от толщины образца и концентрации иона иттербия в фосфиде индия. При этом толщина образцов варьировалась в пределах 0.03 до 0.5 мм, а концентрация иттербия в объемных кристаллах достигала величины $2 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Следует отметить, что неизменность положения максимума $h\nu = 1.38$ эВ в спектре относительного квантового выхода люминесценции иона иттербия отнюдь не сопровождается постоянством его абсолютной величины, которая существенно зависит от концентрации иттербия и электронов в кристалле. На зависимость интенсивности люминесценции иона иттербия от этих факторов уже неоднократно указывалось [1-4].

Энергетическое положение максимума квантового выхода люминесценции иттербия (см. рисунок) совпадает с областью рекомбинационного излучения донорно-акцепторных пар мелких примесей неконтролируемого фона $h\nu = 1.37 \div 1.38$ эВ. Люминесценция этих донорно-акцепторных пар, как правило, доминирует в спектре специально не легированных кристаллов при температурах $4 \div 30$ К, когда их концентрация превышает уровень 10^{16} см⁻³ [5]. В исследованных нами образцах $N_D - N_A \geq 10^{16}$ см⁻³, но не превышает величины $2 \cdot 10^{17}$ см⁻³.

На непосредственное участие мелких донорно-акцепторных пар в процессе возбуждения иона иттербия указывает и отмеченное в [2] перераспределение энергии между этими каналами рекомбинационного излучения, которое приводит к тому, что введение больших концентраций иттербия в кристалл ($N_{Yb} \geq 1 \cdot 10^{17}$ см⁻³) практически полностью подавляет излучение мелких примесей. Однако даже в случае полного подавления излучательной рекомбинации пар максимум в спектре квантового выхода не меняет своего энергетического положения.

Как предполагают авторы [1], возбуждение иона иттербия может быть связано с появлением мелкого акцептора, обусловленного иттербием. Экспериментально это не подтверждается. Однако нами проведена оценка возможности существования такого уровня в двухзонной модели по методу непрерывных дробей [6]. Редкоземельный элемент моделировался потенциалом, существенно большим, чем потенциал замещающего атома, и слабой связью с окружением. Расчет показал, что если уровень существует, то только в верхней половине запрещенной зоны. Следовательно, все указывает именно на участие в процессе возбуждения мелких донорно-акцепторных пар примесного фона фосфида индия.

На возможное участие мелких примесей в процессе возбуждения иона иттербия указывают и спектры возбуждения люминесценции [1, 2], однако только спектр квантового выхода люминесценции позволяет выявить их доминирующую роль. К сожалению, квантовый выход люминесценции не позволяет однозначно оценить квантовую эффективность возбуждения центра иттербия в области энергий $h\nu > 1.40$ эВ, где $ad > 1$. В этой области спектра возбуждающий люминесценцию свет поглощается уже не всем объемом кристалла, а только его приповерхностным слоем. Естественно, возникает вопрос о диффузии возбуждения и его гибели на поверхности кристалла. Ответ на него, вероятно, следует рассматривать уже в виде решения самостоятельной задачи.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Korber W., Hangleiter A. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 52. N 2. P. 114—116.
- [2] Касаткин В. А., Савельев В. П. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 9. С. 1634—1636.
- [3] Korber W., Weber J., Hangleiter A. et al. // J. Cryst. Growth. 1986. V. 79. N 1-3. Pt. 2. P. 741—744.
- [4] Wagner J., Windsheif J., Ennen H. // Phys. Rev. B. 1984. V. 30. N 10. P. 6230—6231.
- [5] Williams E. W., Elder W., Astles A. et al. // J. Electrochem. Soc. 1973. V. 120. N 12. P. 1741—1748.
- [6] Ильин Н. П., Мастеров В. Ф. // Спектроскопия кристаллов. М., 1985. С. 184—194.