

## Фотолюминесценция области пространственного заряда контактов металл–селенид цинка

© В.П. Махний, М.М. Слетов

Черновицкий государственный университет им. Ю. Федьковича,  
274012 Черновцы, Украина

(Получена 16 декабря 1997 г. Принята к печати 8 апреля 1998 г.)

Приведены результаты исследований фотолюминесценции, которая возбуждается  $N_2$ -лазером в области пространственного заряда контактов Ni–ZnSe. Установлено, что модуляция интенсивности фотолюминесценции происходит не только под действием внешнего напряжения, но и в ее отсутствие, в зависимости от режима включения диода — холостого хода или короткого замыкания. Предлагается физическая интерпретация исследуемых закономерностей.

Наличие в полупроводниковом кристалле сильного электрического поля существенно влияет на излучательную рекомбинацию неравновесных носителей заряда [1]. Условия для исследования этих процессов наиболее просто реализовать в структурах с выпрямляющим барьером — гетеропереходах [2,3] или диодах Шоттки [1]. В них, в частности, наблюдаются эффекты модуляции интенсивности фотолюминесценции (ФЛ) электрическим полем барьера. В данной работе приводятся результаты исследований аналогичного явления в контактах Ni–ZnSe.

Исходными подложками служили низкоомные кристаллы  $n$ -ZnSe, содержащие изовалентную примесь Te. Характерной особенностью этих образцов является наличие эффективной (~ 20% при 300 К) оранжевой полосы  $\gamma$ -люминесценции, обладающей высокой температурной и радиационной стойкостью [4]. Технология получения диодных структур описана в работе [5]. Выбор Ni в качестве выпрямляющего контакта обусловлен тем, что он с  $n$ -ZnSe образует достаточно высокий потенциальный барьер [6], а его тонкие слои обладают хорошей прозрачностью в спектральном диапазоне 0.2–1 мкм [7]. ФЛ возбуждалась азотным лазером с  $\lambda_m = 0.34$  мкм, а измерение спектров осуществлялось с использованием монохроматора МДР-23 и системы синхронного детектирования в режиме автоматической записи. Поскольку концентрация ионизированных доноров в подложках диода находится в пределах  $10^{16}$ – $10^{17}$  см $^{-3}$ , ширина области пространственного заряда (ОПЗ) при нулевом смещении составляет величину  $(5 - 15) \cdot 10^{-5}$  см. С другой стороны, коэффициент поглощения  $\alpha$  для ZnSe при  $\lambda_m$  не ниже  $5 \cdot 10^4$  см $^{-1}$  [8], в связи с чем длина поглощения  $\alpha^{-1} \leq 2 \cdot 10^{-5}$  см. Таким образом можно считать, что при нулевом смещении лазерное излучение практически полностью поглощается в ОПЗ диода.

Спектр ФЛ контакта Ni–ZnSe при нулевом смещении является широкой полосой с максимумом около 0.64 мкм (рис. 1). Излучение вызвано переходами свободных электронов на глубокий акцепторный уровень, который обусловлен сложным комплексом [4]. В состав последнего входят двухзарядные пары Френкеля катионной подрешетки и нейтральный атом изовалентной

примеси Te. Величина и знак внешнего напряжения не изменяет положения максимума полосы излучения, однако влияет на ее интенсивность и форму. Изображение на рис. 1 спектральные зависимости  $I$ – $\lambda$  нормированы в максимуме к единице. Увеличение обратного напряжения  $V_r$  приводит к деформации полосы ФЛ, главным образом ее длинноволнового "крыла" (рис. 1), что может быть связано с эффектом Франца–Келдыша. Прямое напряжение  $V_s$  компенсирует контактный барьер, а форма спектра при этом приближается к спектру нейтрального кристалла [4].

Интенсивность  $I_{PL}$  фотолюминесценции существенно зависит от величины и знака приложенного к диоду напряжения, причем  $V_r$  влияет сильнее, чем  $V_s$  (рис. 2). Уменьшение  $I_{PL}$  с ростом  $V_r$  обусловлено увеличением доли электронно-дырочных пар, которые разделяются электрическим полем барьера, не успевая принять участие в излучательной рекомбинации. Отметим, что более

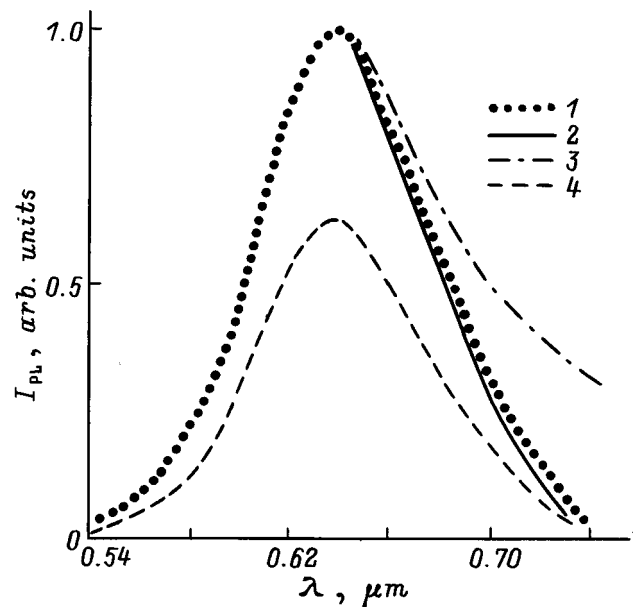
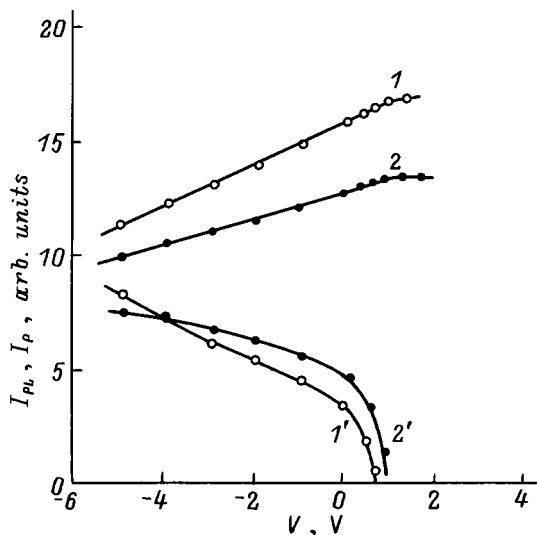


Рис. 1. Спектры ФЛ при разных режимах включения контакта Ni–ZnSe: 1 — режим короткого замыкания, 2 —  $V = 1$  В, 3 —  $V = -6$  В, 4 — режим холостого хода.  $T = 300$  К.



**Рис. 2.** Зависимости  $I_{PL}$  (1, 2) и ( $I'$ ,  $2'$ ) от напряжения на контакте Ni–ZnSe при 300 К. Концентрация нескомпенсированных доноров в подложке диода равны  $10^{16}$  (1) и  $10^{17}$  (2)  $\text{см}^{-3}$ .

разкая зависимость  $I_{PL}(V)$  наблюдается для структур с большей концентрацией ионизированных доноров в подложке диода. Это объясняется увеличением напряженности электрического поля (при одной и той же величине  $V$ ) с ростом уровня легирования. На этом же рисунке изображены зависимости фототока  $I_p$  от  $V$  для двух диодов с различным уровнем легирования. Для каждого образца при конкретной величине обратного напряжения неплохо выполняется эмпирическое соотношение [2,3]:

$$I_{PL} + I_p = \text{const.} \quad (1)$$

Увеличение  $I_{PL}$  при прямом смещении происходит вследствие уменьшения доли носителей, которые разделяются электрическим полем барьера. Последнее с ростом  $V_s$  уменьшается, а вероятность излучательной рекомбинации возрастает.

На исследуемых образцах наблюдалась также зависимость  $I_{PL}$  от режима включения структуры при отсутствии внешнего напряжения. Вместе с тем в отличие от данных работы [3] интенсивность ФЛ диодов Ni–ZnSe при разомкнутых контактах  $I_{PL}^\infty$  меньше, чем при короткозамкнутых  $I_{PL}^0$  (рис. 1). Форма спектра при этом остается неизменной, но отношение  $K_m = I_{PL}^0/I_{PL}^\infty$  растет по мере уменьшения уровня возбуждения. (Отметим, что для кривой 4 на рис. 1 величина  $K_m = 1.65$ ). Отмеченные выше экспериментальные факты можно объяснить следующим образом.

Согласно [6], высота потенциального барьера  $V_c$  контактов металл–ZnSe определяется не только работой выхода металла, но и поверхностными уровнями на границе раздела. Они распределены квазинепрерывно в достаточно широком энергетическом интервале, а их плотность составляет около  $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . В режиме холостого хода фотоносители разделяются электрическим полем барье-

ра, причем электроны движутся в квазинейтральную область кристалла, а дырки — к границе раздела металл–полупроводник. Здесь последние могут быть захвачены поверхностными уровнями, на которых находятся электроны. Таким образом, часть неравновесных дырок исключается из процесса излучательной рекомбинации, что и приводит к уменьшению  $I_{PL}$ . С ростом уровня возбуждения концентрация дырок на поверхностных уровнях возрастает. Избыточный положительный заряд ограничивает поток дырок к поверхности, в результате чего интенсивность ФЛ возрастает. В частности, увеличение уровня возбуждения в 50 раз (по сравнению с мощностью, при которой измерены кривые 1 и 4 на рис. 1) приводит к уменьшению  $K_m$  от 1.65 до 1.05. В режиме короткого замыкания накопления дырок на поверхностных уровнях не происходит вследствие их оттока во внешнюю цепь.

В заключение отметим, что предложенная модель в принципе не запрещает возможность получения  $K_m < 1$ . Для этого в первую очередь необходимо создать условия, при которых напряжение холостого хода будет близко к высоте потенциального барьера. Именно такая ситуация реализуется в гетеропереходах  $ITO\text{--}CdTe$ , рассмотренных в работе [3], и для которых  $V_{oc} \approx V_c$ . Для исследуемых же контактов Ni–ZnSe даже в условиях максимального уровня возбуждения  $V_{oc}/V_c \leq 0.5$ , в связи с чем  $K_m$  всегда больше единицы.

Таким образом, из изложенного следует, что контакты металл–селенид цинка могут быть использованы для модуляции интенсивности ФЛ не только изменением внешнего напряжения, но и без него, производя с определенной частотой замыкание и размыкание контактов диода.

## Список литературы

- [1] Г.П. Пека. *Физические явления на поверхности полупроводников* (Киев, Вища шк., 1984).
- [2] Ж.И. Алферов, Д.З. Гарбузов, Е.П. Морозов. *ФТП*, **1**, 465 (1967).
- [3] Н. Адиб, А.В. Коваль, О.С. Кошуч, А.В. Симашкевич, Д.А. Щербан. *ФТП*, **19**, 2102 (1985).
- [4] В.Д. Рьжиков. *Сцинтилляционные кристаллы полупроводниковых соединений  $A^{II}B^{VI}$*  (М., НИИТЭХИМ, 1989).
- [5] В.П. Махний, В.В. Мельник. *ФТП*, **29**, 1468 (1995).
- [6] В.П. Махний. *Поверхность*, **5**, 83 (1995).
- [7] К. Гопра, С. Дас. *Тонкопленочные солнечные элементы* (М., Мир, 1986).
- [8] *Физика и химия соединений  $A^2B^6$*  (М., Мир, 1970).

Редактор В.В. Чалдышев

## Photoluminescence of space-charge region of metal–selenide zinc contacts

V.P. Makhniy, M.M. Slyotov

Chernovtsy State University  
274012 Chernovtsy, the Ukraine

**Abstract** Presented are results of a research of photoluminescence (*PL*) excited by  $N_2$ -laser in the space-charge region of Ni–ZnSe contact. It has been found that the modulation of *PL* intensity occurs both under the external voltage and when it is absent, being a function of the diode switching regime: no load or short circuit. A physical interpretation of results obtained is given.