

мальными [8]. Поэтому совместное воздействие ГП с агентами, вызывающими локальное закисление клеток опухоли, вероятно, позволит повысить эффективность фотодинамической терапии.

Таким образом, показано, что длительная инкубация клеток с ГП не влияет на их морфологию и вызывает лишь незначительное снижение внутриклеточного рН. Цитотоксический эффект выражен только при совместном воздействии ГП и света. Скорость накопления ГП и его конечная концентрация в злокачественных клетках выше, чем в нормальных. Снижение величины внутриклеточного рН приводит к увеличению концентрации ГП в клетках, что, возможно, и является одной из причин селективного накопления порфиринов в злокачественных клетках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Dougherty T. J. // CRC Crit. Rev. Oncol. Hematol. 1984. 2. P. 83—116.
 [2] Kessel D. // Photochem. Photobiol. 1984. 39, N 6. P. 851—859. [3] Камалов В. Ф. и др. // Квант. электроника. 1985. 12, № 10. С. 1997—2023. [4] Dorschio F. et al. // Lasers in surgery and med. 1982. 2. P. 21. [5] Eidus et al. // Studia Biophysica. 1977. 62. P. 85. [6] Литинская Л. Л. и др. // Деп. ВИНТИ. 1984. № 5267—84. [7] Камалов В. Ф. и др. // Тез. докл. XII Всесоюз. конф. по когерент. и нелинейн. оптике. М. 1985. С. 78. [8] Осинский С. П., Бубновская Л. Н. // Онкология. 1979. № 4. С. 33—40.

Поступила в редакцию
11.10.85

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1986. Т. 27, № 5

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 621.315.592

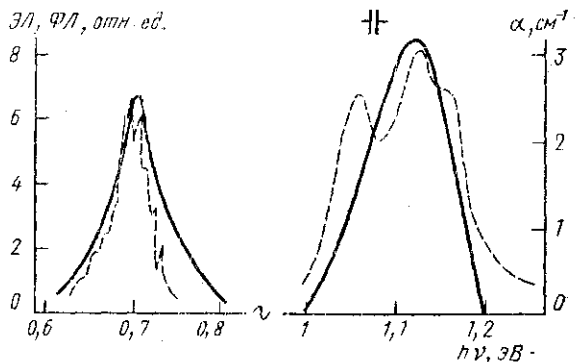
ПРИМЕСНАЯ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ GaAs, ЛЕГИРОВАННОГО V

В. С. Вавилов, В. А. Морозова, О. В. Рычкова

(кафедра физики полупроводников)

При исследовании спектров электропоглощения полуизолирующего *n*-GaAs, легированного ванадием, в области температур 80—300 К обнаружена примесная электролюминесценция (ЭЛ) значительной амплитуды. Образцы формы параллелепипеда с размерами $\sim 1 \times 2 \times 7$ мм помещались в переменное поле плоского конденсатора и были изолированы от его пластин диэлектрическими прокладками. Излучение, вышедшее из кристата (окна пропускали $h\nu \geq 0,5$ эВ), регистрировалось с помощью PbS-фотосопротивления; для измерения использовалась обычная методика фазового детектирования. Излучение возникало при напряженности поля в образце $E > 7 \cdot 10^3$ В/см, его интенсивность заметно возрастала с увеличением E и T . ЭЛ регистрируется на второй гармонике и в области 100—700 Гц не зависит от частоты. С помощью монохроматоров УМ-2 и ИКС-21 были записаны спектры ЭЛ. На рисунке приведен один из них для

$E = 2,3 \cdot 10^4$ В/см и 80 К (сплошные линии). Видно, что ЭЛ наблюдается в двух областях спектра: $h\nu \sim 0,7$ и $\sim 1,1$ эВ. Здесь же штриховыми линиями обозначены спектр поглощения $\alpha(h\nu)$ данного образца при 80 К и спектр фотолюминесценции (ФЛ) ана-



Спектры ЭЛ GaAs:V при $E = 2,3 \cdot 10^4$ В/см и 80 К (сплошные линии). Штриховые линии — спектр ФЛ при 6 К из [1] и спектр $\alpha(h\nu)$ при 80 К

логичного материала при 6 К, взятый из работы [1]. Подобные спектры $\alpha(h\nu)$ с характерной только для атомов V резонансной структурой, состоящей из трех сравнительно широких перекрывающихся полос, на-

блюдались и ранее, при этом поглощение связывалось с внутрицентровыми оптическими переходами атома V^- (либо V^0 [2]), чьи возбужденные состояния находятся в резонансе с непрерывным спектром состояний зоны проводимости [1, 3, 4]. Спектры ФЛ GaAs:V с тонкой структурой на фоне интенсивной полосы примесного излучения наблюдаются только в области $h\nu \sim 0,7$ эВ [1—9]. Вопрос о том, какие центры ответственны за спектры ФЛ, до последнего времени оставался дискуссионным: в одних работах [1, 5, 6, 9] ФЛ приписывают внутрицентровым переходам атома V^- , в других [7, 8] — V^0 . Поглощения в области $\sim 0,7$ эВ и ФЛ в области $\sim 1,1$ эВ не было обнаружено.

Близкое соответствие наблюдаемых нами спектров ЭЛ в области $h\nu \sim 1,1$ эВ спектрам $\alpha(h\nu)$ позволяет однозначно связать их с одним и тем же внутрицентровым переходом атома V^- , так же как спектр ЭЛ в области $\sim 0,7$ эВ — с тем же внутрицентровым переходом, что и спектр ФЛ. Одновременное наблюдение примесной люминесценции в двух областях спектра позволяет отказаться от гипотезы о больших и различных по величине эффектах Яна—Теллера для основного и возбужденного состояний атома V^- . Эта гипотеза возникла из предположения, что спектры $\alpha(h\nu)$ и ФЛ обусловлены одним и тем же внутрицентровым переходом атома V^- [4]. Остается неясным, каковы зарядовые состояния атомов V (V^- либо V^0), ответственных за полосы ЭЛ. Если допустить [1, 3], что ЭЛ в областях $\sim 1,1$ эВ и $\sim 0,7$ эВ обусловлена различными внутрицентровыми переходами атома V^- , то следует ожидать, что постановка Si- и Ge-фильтров уменьшит интенсивность ЭЛ, попадающей на фотоприемник, в одинаковой пропорции для каждого образца. Эксперимент же показывает другое: интенсивность ЭЛ при Si-фильтре уменьшается в ~ 3 — $3,5$ раза для всех образцов, а при Ge-фильтре — от 6 до 9 раз, т. е. обе люминесцентные полосы не удается связать с одним центром V^- . Так как в каждом образце имеется свое соотношение концентраций центров V^- и V^0 , оно и может определять разницу в ослаблении различными фильтрами.

Учитывая литературные данные, нам представляется естественным связать ЭЛ в области $h\nu \sim 1,1$ эВ с внутрицентровым переходом атома V^- , чьи возбужденные состояния попадают в зону проводимости [1, 3, 4], а ЭЛ в области $\sim 0,7$ эВ с внутрицентровым переходом атома V^0 в согласии с последними данными магнито-оптики [7, 8].

Электролюминесценция изолированных от электродов кристаллов, возбуждаемых переменным полем, известна как эффект Дестрио. Суть его в том, что в первую половину полупериода за счет энергии поля возникают свободные носители заряда, которые поле разводит к противоположным граням кристалла, а во вторую — носители двигаются в обратном направлении и рекомбинируют с излучением; при этом сигнал должен наблюдаться на второй гармонике. В нашем случае (в отличие от эффекта Дестрио) не наблюдается отставания по фазе сигнала ЭЛ относительно приложенного напряжения.

Исследование при тех же T и E спектров электропоглощения и эффекта Покельса данных образцов также указывает на особенности в областях $h\nu \sim 0,7$ и $1,1$ эВ, при этом возникновение ЭЛ не сопровождается появлением заметной концентрации свободных носителей, т. е. образец остается высокоомным. В связи с этим напрашивается предположение, что неоднородное распределение примесей и поля по образцу может привести к возрастанию роли туннелирования (межпримесное, внутрицентровое, в зону проводимости) электронов из основных в возбужденные состояния центров с последующим переходом в основные состояния с испусканием фотонов. Кроме того, возникновение примесной ЭЛ в GaAs в полях $E \gtrsim 10^4$ — 10^5 В/см может быть связано с ударной ионизацией примесных центров.

Интересно отметить, что в образце GaP:Fe (энергия внутрицентровых переходов атомов $Fe^- \simeq 0,4$ эВ) при $E \gtrsim 10^4$ В/см и 300 К также возникает примесная ЭЛ в области $h\nu < 0,7$ эВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Васильев А. В., Ипполитова Г. К., Омеляновский Э. М., Рыскин А. И. // ФТП, 1976. 10. С. 571. [2] Mircea-Roussel A., Martin G. M., Lowther J. E. // Solid State Comm. 1980. 36, N 2. P. 171. [3] Омеляновский Э. М., Фистуль В. И. Примеси переходных металлов в полупроводниках. М.: Металлургия, 1983. [4] Мастеров В. Ф. // ФТП. 1984. 18. С. 2. [5] Kaufmann U. et al. // Phys. Rev. B. 1982. 25. P. 5598. [6] Ушаков В. В., Гиппиус А. А. // ФТП. 1980. 14. С. 336. [7] Armelles G., Barrau J., Thebaut D. // J. Phys. C. 1984. 17. P. 6883. [8] Armelles G., Barrau J., Thebaut D., Brousseau M. // J. de Physique. 1984. 45. P. 1795. [9] Vasson A. M., Vasson A., Bates C. A., Labadz A. F. // J. Phys. C. 1984. 17, N 31. P. L837.