

Внутрицентровое возбуждение состояний меди в фосфиде индия, компенсированном медью

© В.А. Мельник[†], Н.Н. Прибылов*, С.И. Рембеза, Ф.В. Макаренко

Воронежский государственный технический университет,
394026 Воронеж, Россия

* Российский государственный открытый технический университет путей сообщения, Воронежский филиал,
394026 Воронеж, Россия

(Получена 1 апреля 2008 г. Принята к печати 9 апреля 2008 г.)

При исследовании спектров примесной фотопроводимости образцов фосфида индия, компенсированного медью, обнаружен резонансный переход из одного состояния меди в другое с максимумом оптической энергии возбуждения 0.31 эВ. Получена температурная зависимость величины максимума интенсивности внутрицентрового перехода в диапазоне от 90 до 450 К. Установлено, что термическая энергия возбуждения составляет 0.42 эВ.

PACS: 71.55.Eq, 78.30.Fs, 78.40.Fy, 72.40.+w

1. Введение

Фосфид индия и фосфид галлия после компенсации медью проявляют высокую чувствительность к излучению. Причины, вызывающие фоточувствительность, до конца не изучены. По данным [1], медь в GaP:Cu и InP:Cu образует 2 уровня, расположенных друг от друга на 0.2 эВ, нижний из которых — уровень *A* находится выше потолка валентной зоны на ~ 0.5 эВ у GaP:Cu и на ~ 0.3 эВ у InP:Cu. Концентрация состояний верхнего уровня *B* при этом намного меньше нижнего. В работе [2] показано, что медь проявляет амфотерные свойства, и, предположительно, атом может находиться в двух состояниях: замещения — с тетраэдрической конфигурацией связей, а также связанным с вакансией в межузельном положении. За счет этого в GaP:Cu могут образовываться центры, проявляющие акцепторные (A^-) и донорные (B^+) свойства. В работе [3] полоса фотопроводимости с максимумом при 1.05 эВ связывалась с внутрицентровым возбуждением центра меди. При объяснении особенностей спектров собственной фотопроводимости InP:Cu в работе [4] привлекались представления, ранее сформулированные для центров меди в фосфиде галлия. Однако прямых экспериментальных данных, указывающих на присутствие полос внутрицентрового возбуждения центров меди в фосфиде индия, нам не известно.

Предполагая, что медь в этих полупроводниковых материалах проявляет похожие свойства, целью исследования стало изучение примесной фотопроводимости в образцах InP:Cu.

2. Методика эксперимента и результаты

Образцы фосфида индия, использовавшиеся в исследованиях, изготавливались аналогично представленным в работе [4]. Контакты к ним в виде параллельных

полосок создавались путем припаивания медных проводочек оловянно-серебряным припоем (Sn — 96.5%, Ag — 3.5%) на расстоянии 2.5–3 мм.

Эксперименты проводились с использованием установки на базе инфракрасного спектрофотометра ИКС-21 с призмой NaCl, модернизированной под управление и прием данных от компьютера, при постоянном потоке излучения, падающем на образец [5,6]. Сигнал фотопроводимости (ФП) снимался с нагрузочного резистора сопротивлением 100 кОм и регистрировался по модуляционной методике с синхронным детектированием на частоте модуляции 9 Гц. В качестве усилителя использовался селективный нановольтметр „Unipan 232B“. Исследуемый образец помещался внутрь криостата, в котором создавался вакуум $2 \cdot 10^{-2}$ Торр. Исследования проводились в диапазоне температур от 90–450 К.

При проведении экспериментов режим постоянного поля соблюдался не всегда, поэтому полученные данные пересчитывались по формуле, приведенной в работе [7]:

$$\Delta\sigma = \frac{u(R + r_0)^2}{r_0^2 UR - ur_0 R(r_0 + R)}, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma$ — ФП образца, u — переменная составляющая напряжения на входе усилителя, R — сопротивление нагрузочного резистора, r_0 — темновое сопротивление образца, U — напряжение источника питания.

При регистрации ФП в условиях комнатной температуры у некоторых образцов InP:Cu в примесной области спектра обнаружено наличие максимума с энергией ~ 0.34 эВ. Пик полностью исчезал при охлаждении образца (рис. 1). Были измерены температурные зависимости максимума ФП с энергией квантов 0.34 эВ при нагреве до 450 К (рис. 2), а также темновой проводимости (рис. 3). Температурная энергия активации максимума ФП составила 0.41 эВ, а темновой проводимости — 0.45 эВ (для участка максимальной крутизны). Пик при ~ 0.34 эВ несколько уширен на коротковолновом спаде полосы, что косвенно указывает на наличие дополнительного процесса фотогенерации. Регистрация

[†] E-mail: Gloriy_@mail.ru

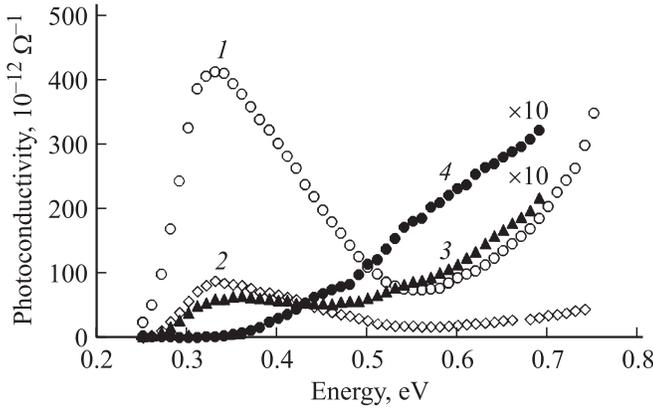


Рис. 1. Спектры фотопроводимости образца InP:Cu при температурах T , К: 1 — 298, 2 — 238, 3 — 215, 4 — 145.

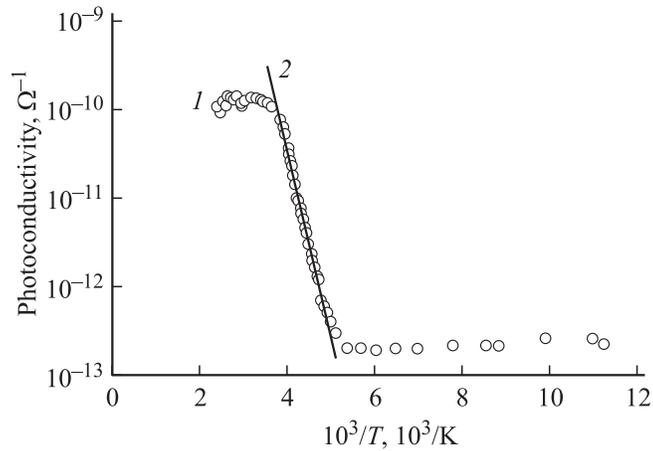


Рис. 2. Температурная зависимость максимума внутрицентрового перехода Cu: 1 — экспериментальные данные, 2 — аппроксимация уравнением Аррениуса с энергией 0.41 эВ.

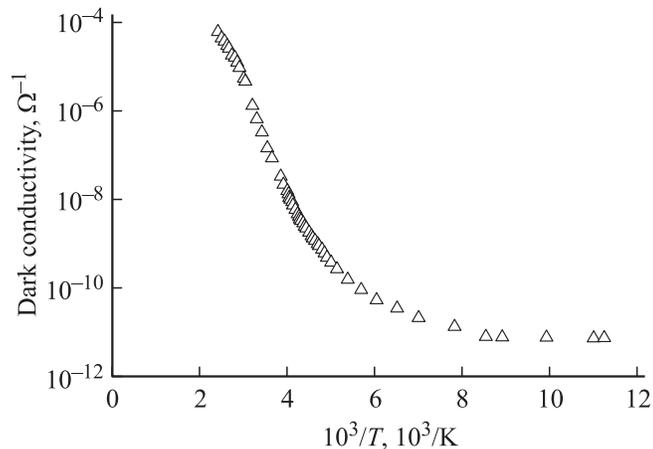


Рис. 3. Температурная зависимость темновой проводимости образца InP:Cu.

спектра при наличии дополнительной немодулированной подсветки (с энергией квантов 1.95 эВ), вызывающей собственные переходы, выявила явление гашения ФП и даже образование отрицательной ФП с экстремумом при ~ 0.6 эВ (рис. 4).

Внутрицентровое возбуждение можно описать функцией Пекара [8]:

$$P(h\nu) = A \operatorname{sh}\left(\frac{\hbar\Omega}{2kT}\right) \exp\left[-\frac{(h\nu - E_0 - S\hbar\Omega)^2}{4kTS\hbar\Omega}\right], \quad (2)$$

где $h\nu$ — энергия квантов, A — подгоночный множитель, $\hbar\Omega$ — средняя энергия участвующих в переходе фононов, k — постоянная Больцмана, T — температура образца, E_0 — разность энергий двух конечных состояний перехода, S — фактор Пекара–Хуан–Куна.

Выражение (2) хорошо аппроксимирует длинноволновую часть пика (рис. 5) с параметрами: $E_0 = 0.3-0.31$ эВ, $S = 1$, $\hbar\Omega = 0.0392$ эВ (для поперечных (TO) и продольных (LO) оптических фононов в соответствии с данными [9]). На вид аппроксимирующей

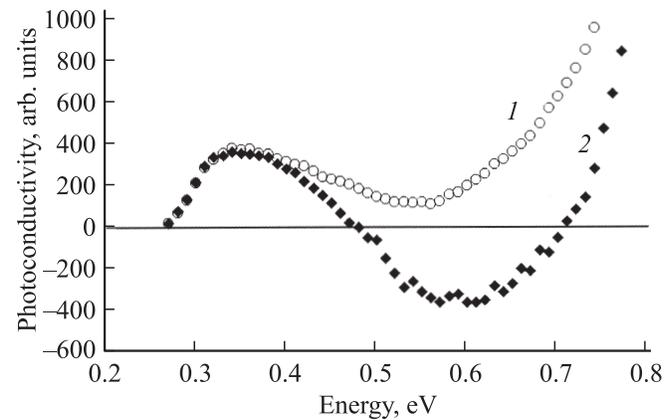


Рис. 4. Влияние немодулированной подсветки с энергией собственных переходов на спектр фотопроводимости InP:Cu: 1 — спектр без подсветки, 2 — спектр с подсветкой (максимум энергии излучения составляет 1.95 эВ).

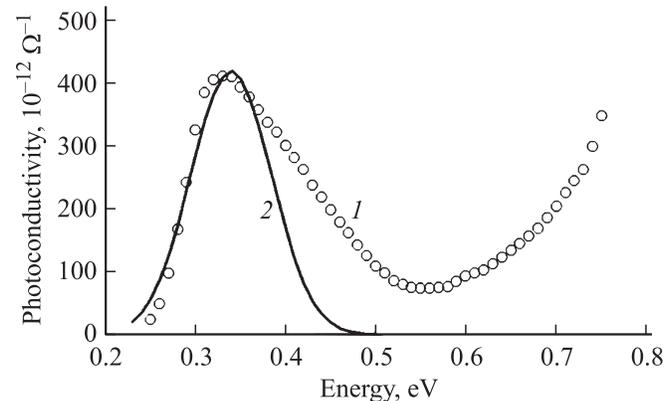


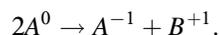
Рис. 5. Аппроксимация экспериментальных данных (1) функцией Пекара (2).

кривой основное влияние оказывает только произведение $S\hbar\Omega$, и если использовать энергии акустических ТА- и LA-фононов, величины которых равны 0.0078 и 0.0156 эВ [9], полученное слабое электрон-фононное взаимодействие может быть усилено (фактор Пекара–Хуан–Куна равен 3 и 5 соответственно).

3. Обсуждение экспериментальных данных

Полученные экспериментальные результаты, предположительно, могут быть объяснены следующим образом. В представленном спектральном диапазоне наблюдается наложение процессов фотовозбуждения дырок с уровней меди в валентную зону InP. Коротковолновая часть спектра определяется возбуждением дырок с уровня A и фотовозбуждением дырок с уровня B : при низких температурах это видно из зависимости I на рис. 1. При повышении температуры начинает проявляться полоса резонансного вида, являющаяся следствием фототермического возбуждения дырки с уровня B : сначала центр с локализованной на уровне B дыркой переходит под действием излучения в возбужденное состояние, являющееся метастабильным, а затем осуществляется термический переход связанной с центром дырки в валентную зону.

Энергии активации темновой проводимости исследованного образца и величины фотопроводимости (рис. 2, 3) близки к полусумме энергий уровней A и B . Это обстоятельство косвенно подтверждает автокомпенсацию легированного медью материала: нейтральные состояния меди энергетически не выгодны и в равновесии происходит их перезарядка по схеме



При подсветке образца красным светом постоянной интенсивности происходят генерация электронно-дырочных пар и захват неравновесных носителей уровнями меди. Поскольку концентрация центров A^{-1} превышает концентрацию центров B^{+1} , собственное возбуждение определяет электронный тип фотопроводимости — дырки захватываются отрицательно заряженными центрами меди. Появление области гашения собственной фотопроводимости определяется, как видно из рис. 4, уровнем A — дырки, локализованные на уровне A , оптически возбуждаются в валентную зону и рекомбинируют с электронами проводимости.

4. Заключение

Неудачное описание коротковолнового спада резонансной полосы связано, скорее всего, с присутствием дополнительного оптического возбуждения дырок с уровня A , однако предварительный анализ показывает, что простые модели фотоионизации глубоких центров [10,11] не дают положительных результатов.

Список литературы

- [1] P.O. Fagerstorm, H.G. Grimmeis, H.H. Titze. J. Appl. Phys., **49**, 3341 (1978).
- [2] Н.Н. Прибылов, С.И. Рембеза, А.А. Сустретов. ФТП, **28** (3), 467 (1994).
- [3] Н.Н. Прибылов, В.А. Буслов, С.И. Рембеза, С.А. Сушков, А.В. Москвичев. Перспективные материалы, **3**, 28 (2002).
- [4] Ф.В. Макаренко, Н.Н. Прибылов, С.И. Рембеза, В.А. Мельник. ФТП, **42** (5), 542 (2008).
- [5] Ю.В. Захаров, Н.Н. Прибылов, С.И. Рембеза. ПТЭ, **5**, 240 (1988).
- [6] В.А. Мельник, А.А. Кожевников, Ф.В. Макаренко. В сб.: *Компьютерные технологии в технике и экономике*, под ред. А.И. Шиянова (Воронеж, Изд-во Междунар. ин-та компьют. технологий, 2007) с. 62.
- [7] С.М. Рывкин. *Фотоэлектрические явления в полупроводниках* (М., Физматгиз, 1963) с. 40.
- [8] С.В. Булярский, Н.С. Грушко. *Генерационно-рекомбинационные процессы в активных элементах* (М., Изд-во Моск. ун-та, 1995).
- [9] П.И. Баранский, В.П. Клочков, И.В. Потыкевич. *Полупроводниковая электроника*. Справочник (Киев, Наук. думка, 1975) с. 341.
- [10] G. Lucovsky. Sol. St. Commun., **3**, 299 (1965).
- [11] V.I. Kirillov, D.I. Materikin, E.I. Pribylova, Yu.A. Kapustin, S.I. Rembeza. Phys. Status Solidi B, **128**, 163 (1985).

Редактор Т.А. Полянская

Intracentral excitation of copper states of copper-doped indium phosphide

V.A. Melnik, N.N. Pribylov*, S.I. Rembeza, Ph.V. Makarenko

Voronezh State Technical University,
394026 Voronezh, Russia

* Russian State Open Technical University
of Railway Transport, the Voronezh branch,
394026 Voronezh, Russia

Abstract At research of spectrums of the impurity photoconductivity of samples of copper-doped indium phosphide, resonant transition from one state of copper in another with a maximum of an optical excitation energy 0.31 eV has been found. Temperature dependence of a maximum intracentral transition over the range from 90 up to 450 K is obtained. It set that the thermal excitation energy makes 0.42 eV.