

УДК 621.383

АППРОКСИМАЦИЯ СПЕКТРА ПОГЛОЩЕНИЯ ФОСФИДА ИНДИЯ В КОНТЕКСТЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОЧУВСТВЛЕНИЯ

© 2024 г. Ф. В. Макаренко*, В. К. Зольников, А. И. Заревич,
Н. Ю. Заленская, А. В. Полуэктов

Воронежский Государственный Лесотехнический Университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия

*E-mail: phillipp@mail.ru

Поступила в редакцию 11.03.2024 г.

После доработки 25.04.2024 г.

Принята к публикации 25.04.2024 г.

Рассмотрены фундаментальные свойства фосфида индия, легированного теллуром и впоследствии компенсированным медью. Представлены данные о существовании 4-х качественных картин эмпирических спектров фотопроводимости InP: Cu в собственной области. Указаны работы с полуэмпирической аппроксимацией фотопроводимости очувствленных образцов InP: Cu. Отмечено, что фотопроводимость $I_{\Phi}(\alpha(\hbar\omega))$ аналитически аппроксимировалась, как функция экспериментально-полученной спектральной зависимости коэффициента поглощения фосфида индия. Предложено пять аппроксимирующих функций с целью получения аналитической зависимости коэффициента поглощения фосфида индия $\alpha(\hbar\omega)$. Получено 5 зависимостей с различными значениями среднеквадратичного отклонения. На основании аналитических зависимостей произведено моделирование полной аналитической зависимости $I_{\Phi}(\alpha(\hbar\omega))$. Аналогично, получено 5 зависимостей, охарактеризованных соответствующим значением среднеквадратичного отклонения. Построено 5 нестационарных поверхностных фотопроводимости I_{Φ} (как функции двух переменных: коэффициента поглощения, как функции от энергии фотонов и времени выдержки образца при нормальных условиях). Сделан вывод о выборе наиболее математически точной и имеющей физический смысл аппроксимирующей функции $\alpha(\hbar\omega)$. Соответственно, показано, что эта зависимость является оптимальной для получения на ее основе (включения этой зависимости в структуру $I_{\Phi} = f(\alpha)$ и $\alpha = f(\hbar\omega)$) полного аналитического описания процесса фотопроводимости. Показано, что последующие исследования могут быть направлены на объяснение физических основ фотопроводимости в коротковолновой области фундаментальных переходов фосфида индия, а также исследования способов воздействия на поверхностный слой InP: Cu, с целью ее очувствления и стабилизации.

Ключевые слова: фосфид индия, аппроксимация, коэффициент поглощения, фотопроводимость, глубокие примеси, поверхностные эффекты, среднеквадратичное отклонение, спектральный максимум, расслоение

DOI: 10.31857/S0544126924040041

1. ВВЕДЕНИЕ

Индия фосфид (InP) — при нормальных условиях представляет собой монокристаллический прямозонный полупроводниковый материал с решеткой типа сфалерита. Ширина запрещенной зоны варьируется (по разным данным) от 1.28–1.37 эВ (чаще 1.34–1.35 эВ) при комнатной температуре. Такой широкий разброс, вероятно, обусловлен особенностью состояния поверхности исследуемого материала. Одним из наиболее информативных методов определения ширины запрещенной зоны полупроводникового материала является оптический и электрооптический методы. Это определение небольшого диапазона энергии квантов, соответствующему интенсивному поглощению

исследуемого материала фотонов света, а также, анализ эксперимента по определению фотопроводимости материала, в зависимости от плавно изменяющейся длины волны подаваемого монохромного излучения. В работах [1], [3–4] были представлены условия обнаружения и преобладания одного из двух (основного и дополнительного) экстремумов спектра фотопроводимости InP: Cu, с учетом положения основного (истинного) пика и определяется энергия фундаментальных переходов полупроводника, однако его легко можно перепутать с дополнительным (в случае преобладания по амплитуде последнего).

Вообще говоря, соотношение максимумов зависит от качества подготовки (обработки) поверхности, от степени ее состаривания (релаксации

поверхностных механических напряжений) и от степени легирования фосфида индия примесями (глубокими и мелкими), характеризующей расслоение рекомбинационного параметра в приповерхностной области вглубь образца [1], [3–4], [37].

В зависимости от вышеописанных условий в первые часы после полировки поверхности InP: Cu (Индия фосфид, легированный (компенсированный) [1], [3–4], [37], [39] медью, формирующей глубокие примесные уровни в зоне запрещенных энергий полупроводника). Можно увидеть 4 разные картины.

1. Узкий пик с положением максимума 1.30–1.32 эВ (с шириной 0.05 эВ на высоте 66%). Это и есть истинный стабильный фундаментальный пик;

2. Пик с положением максимума 1.34–1.36 эВ (с шириной 0.12 эВ на высоте 66%) Это и есть основной нестационарный дополнительный высокоэнергетический (имеется ввиду по энергии квантов, но не амплитуде) пик;

3. Широкий пик с положением максимума 1.32–1.33 эВ (с шириной 0.25 эВ на высоте 66%). Это результат сложения двух предыдущих пиков.

4. Вариант сразу с двумя ярко выраженными максимумами: первый — 1.30–1.3, второй — 1.34–1.37.

В случаях со 2 по 4 амплитуда фотопроводимости релаксирует минимум на порядок (и более) в течение 2–3 суток до случая, описанного в пункте 1.

В работах [1], [3–4], [37–40] было проведено моделирование и объяснение процессов, происходящих в теле полупроводниковой структуры InP: Cu. В основе всего лежала аппроксимация, описывающая спектральную зависимость фотопроводимости материала в зависимости от коэффициента поглощения фосфида индия (полученного эмпирическим путем [1], [20], [41–42]), который, в свою очередь, является функцией энергии квантов (длины волны) подаваемого на образец излучения. Коэффициенты этого выражения характеризовали расслоение образца по рекомбинационному параметру носителей зарядов (дырок и электронов). Однако в этих работах в силу степенного характера зависимости поглощения было сделано несколько допущений:

1. Авторы условились, что коэффициент поглощения InP: Cu и чистого InP, значительно не отличается (и, как покажет наше исследование, видимое отличие действительно существует, но не влияет на качественное описание результата и порядки величин).

2. Хвосты в коротковолновой (высокоэнергетической) и длинноволновой (низкоэнергетической) частях спектра были аппроксимированы. Однако, повторяю, что эти “хвосты” не попадают на область спектра ФП (фотопроводимости),

содержащей экстремумы (два максимума и один минимум, расположенный между ними)

3. Источники [41–42], с которыми сравнивались экспериментальные результаты (с учетом погрешности), достоверны и авторитетны. Однако, не во всех случаях, не на всех участках давали высокую точность.

Отмечу однако, что даже в случаях максимальной ошибки при крайних отклонениях и разбросах, качественная картина, описывающая эмпирические максимумы кардинально не менялась.

4. Целью настоящей работы является аппроксимация частотной зависимости коэффициента поглощения InP (InP: Cu), попытка объяснения ее механизмов. И создание полностью аналитической трехмерной поверхности зависимости фотопроводимости InP: Cu от энергии квантов и временного параметра.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ПОГЛОЩЕНИЯ В INP

С целью осуществления поставленной задачи кратко напомним основные характеристики InP (см. рис. 1).

Твердая фаза фосфида индия при нормальных условиях представляет собой решетку типа “сфалерит”. Постоянная решетки при 300 К равна 5.8687 Å, относительная молекулярная масса 144.63, количество атомов в см³ — 3.96·10²². Плотность в твердом состоянии — 4.81 г/см³.

Зонная структура InP при нормальных условиях [45–46] показана на рис. 2.

В первом приближении, эмпирическое определение области частот с резким нарастанием доли поглощаемого полупроводником световой энергии говорит об обнаружении (первичной оценке) ширины запрещенной зоны материала. Как правило, эта область в спектре поглощения обусловлена оптическими переходами между состояниями валентной зоны и зоны проводимости. Однако, характер поглощения бывает разным. Согласно [46–48] для прямозонных полупроводников существуют два механизма поглощения: “Прямые разрешенные переходы” и “Прямые запрещенные переходы”.

Важной характеристикой оптических переходов в полупроводниках между состояниями валентной зоны и зоны проводимости является M_{vc} — матричный элемент дипольного момента оптического перехода между E_v и E_c [46–48]. Матричный элемент M_{vc} можно разложить по степеням k

$$M_{vc} = M_{vc}|_{k=0} + \left. \frac{\partial M_{vc}}{\partial k} \right|_{k=0} \cdot k + \dots \quad (1)$$

В случае, когда межзонный переход разрешен в дипольном приближении, при $k = 0$, матричный

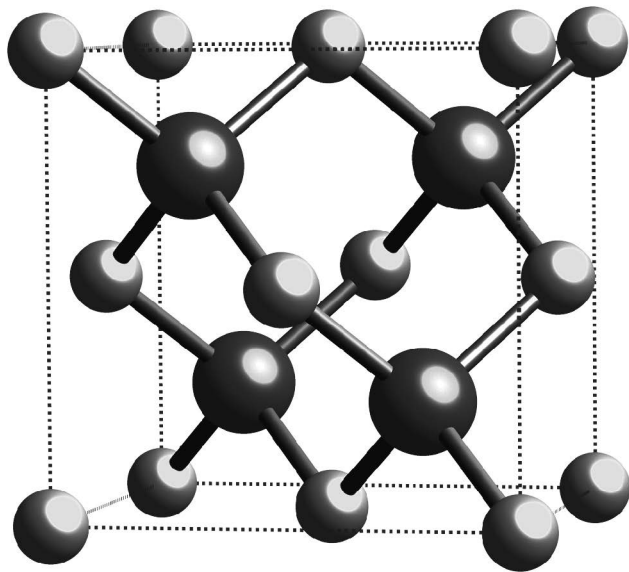


Рис. 1. Кристаллическая решетка InP.

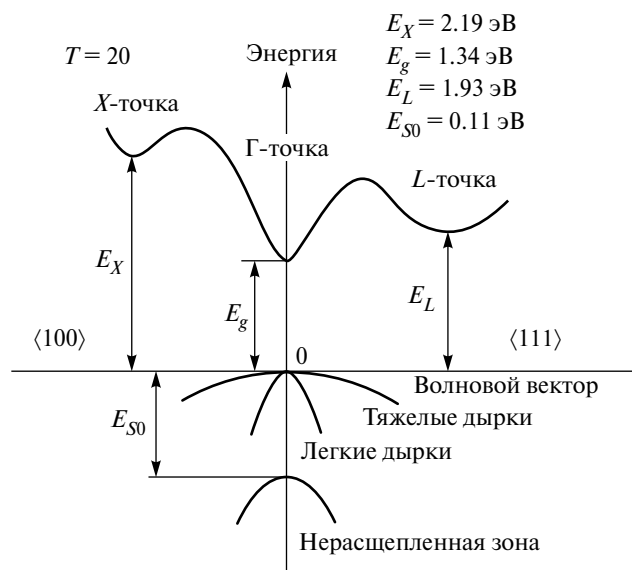


Рис. 2. Объемная зонная структура InP.

элемент $M_{vc}(k)$ в окрестности экстремума можно считать константой, иные же члены малы и их вкладом можно пренебречь. Коэффициент поглощения α при прямом разрешенном переходе пропорционален плотности состояний E , изменяющейся по закону квадратного корня

$$\alpha(\hbar\omega) = A(\hbar\omega - E_g)^{1/2}, \quad (2)$$

где A — это параметр, определяющийся по нижеприведенной формуле

$$A = 3,38 \cdot 10^5 \cdot n^{-1} (m_e/m_0)^{1/2} \cdot (E_g/\hbar\omega). \quad (3)$$

В представленном простейшем приближении в случае “Прямых разрешенных переходов” для

энергии фотонов, превышающих энергию ширины запрещенной зоны, коэффициент поглощения пропорционален $(\hbar\omega - E_g)^{1/2}$.

В случае, когда $M_{vc}|_{k=0} = 0$ имеет место быть случай “Прямых запрещенных переходов”, где M_{vc} растет пропорционально k при отходе от точки $k = 0$. Тогда, согласно [46–48]:

$$\alpha(\hbar\omega) = C(\hbar\omega - E_g)^{3/2}, \quad (4)$$

где C — медленно меняющаяся функция (из-за громоздкости здесь не приводим, см. [46]), которую для наших рассуждений можно принять за константу (как и, в предыдущем случае, величину A).

Теперь перейдем к непосредственному процессу аппроксимации эмпирически полученного коэффициента поглощения фосфида индия [1], [3], [41–42], изначально легированного примесью Теллура и компенсированного Медью.

Возьмем за основу формулу 2. Однако, даже на начальном этапе видно, что степень $1/2$ растет достаточно медленно, в то время как значение коэффициента поглощения меняется более чем на 6 порядков на узком участке энергий.

Отметим, что на основании сведений из различных источников [1]–[35] кроме огромного количества мелких уровней n -типа в зоне запрещенных энергий, как минимум, присутствует до пяти глубоких уровней, образованных путем легирования медью, железом, или иными примесями и дефектами.

Во всех кристаллах InP: Cu, по данным электрических измерений, присутствует донорный уровень с энергией активации 0.49 эВ. В более низкоомном образце обнаружен еще один донорный уровень с энергией активации 0.17 эВ. Полученные авторами [6–7] спектры фотопроводимости (ФП) позволяют сделать вывод о присутствии в образцах акцепторного уровня $E_v + 0.33$ эВ. Этот уровень был ранее обнаружен авторами в специально не легированном медью n -InP [7]. Был сделан вывод о принадлежности уровня $E_v + 0.33$ эВ меди.

В работах [8], [25] выявлены значения энергии активации доноров: 0.43, 0.49, 0.77, 0.82 эВ и акцепторов — 0.56 эВ. Согласно [2], [19] эффект фотопроводимости за счет примесных уровней InP: Cu начинается с 0.2 эВ и до области собственных поглощений, и при некоторых условиях наблюдения фотопроводимости [2], [19] могут наблюдаться максимумы примесной фотопроводимости (около 0.3 эВ), или изменение наклона кривой (около 0.5 эВ).

Таким образом, можно сделать предположение о, наличии значимой доли поглощения в длинноволновой (чуть меньше значения E_g) части общего спектра поглощения. Отметим, что область коэффициента поглощения $10^{-1} < \alpha(\hbar\omega) < 10^1$ описывается нами (с использованием одного из примесных уровней и высокой степенной зависимостью)

исключительно с целью получения общей картины и не имеет физического смысла. Вероятнее всего этот участок состоит из суммы примесных поглощений, не исключается наличие экситонов. Но в нашем случае эта область не попадает в диапазон собственного поглощения (в область описанных во введении экстремумов собственной фотопроводимости, более 1.3 эВ), и, вероятно, представляет интерес для дополнительного исследования в будущем.

Руководствуясь данным допущением, была предпринята первая попытка аппроксимации (см. рис. 3) согласно формуле 5

$$\alpha_{\text{InP:Cu}}(\hbar\omega) = A_1 (\hbar\omega - E_g)^{1/2} + A_2 (\hbar\omega - E_{\text{ур}})^{85/2}, \quad (5)$$

где $A_1 = \text{const} = 350000$,

$A_2 = \text{const} = 180$,

$E_g = 1.34$ эВ,

$E_{\text{ур}} = 0.4$ эВ,

$\lg(\sigma) = 10.052$.

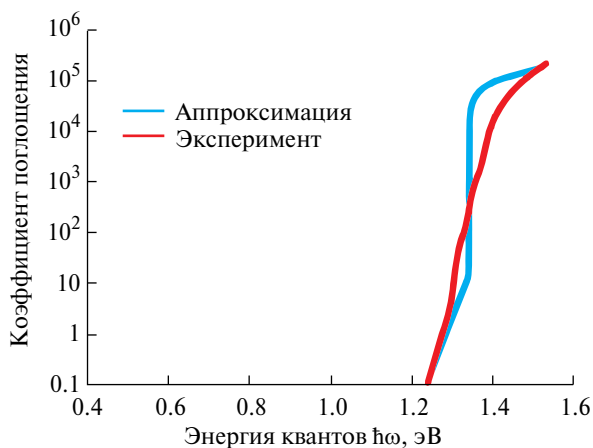


Рис. 3. Аппроксимация коэффициента поглощения InP: Cu исходя из представления “Прямых разрешенных переходов” с допущением в длинноволновой части спектра.

Как видим, такой вариант достаточно плохо описывает экспериментальные данные.

Теперь аппроксимируем коэффициент поглощения, считая, что в нашем образце реализуется случай “Прямых запрещенных переходов”. Тогда зависимость будет описываться степенью $3/2$.

$$\alpha_{\text{InP:Cu}}(\hbar\omega) = C_1 (\hbar\omega - E_g)^{1/2} + C_2 (\hbar\omega - E_{\text{ур}})^{84/2}, \quad (6)$$

где $C_1 = \text{const} = 2200\,000$,

$C_2 = \text{const} = 160$,

$E_g = 1.34$ эВ,

$E_{\text{ур}} = 0.4$ эВ,

$\lg(\sigma) = 7.897$.

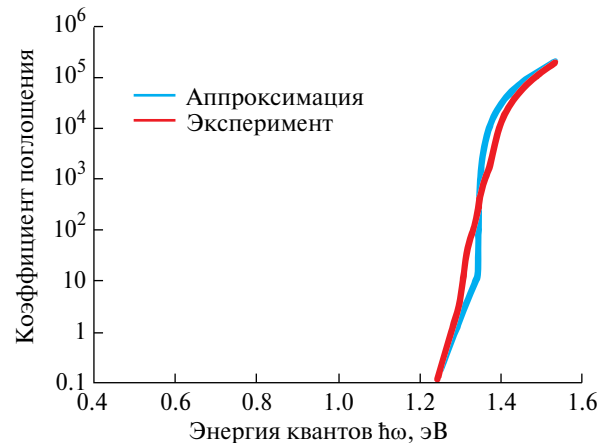


Рис. 4. Аппроксимация коэффициента поглощения InP: Cu исходя из представления “Прямых запрещенных переходов” с допущением в длинноволновой части спектра.

Как видно из рис. 4, среднеквадратичное отклонение уменьшилось. Тем не менее, результат еще далек от идеала. Две предыдущие аппроксимации проводились исходя из табличного значения ширины запрещенной зоны фосфида индия $E_g = 1.34$ эВ.

Более хороший результат получается при повышении степени до следующего вида (см. рис. 5):

$$\alpha_{\text{InP:Cu}}(\hbar\omega) = C_1 (\hbar\omega - E_g)^{6/2} + C_2 (\hbar\omega - E_{\text{ур}})^{84/2}, \quad (7)$$

где $C_1 = \text{const} = 3000\,000$,

$C_2 = \text{const} = 170$,

$E_g = 1.34$ эВ,

$E_{\text{ур}} = 0.4$ эВ,

$\lg(\sigma) = 7.743$.

Однако такой подход, во-первых, не показал идеальных результатов, а во-вторых, не имеет физического смысла.

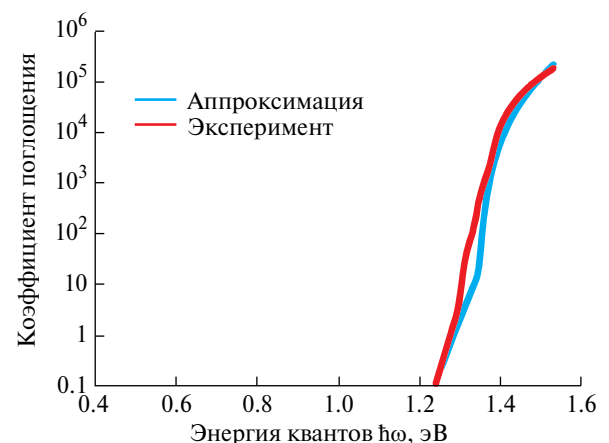


Рис. 5. Аппроксимация коэффициента поглощения InP: Cu для степени “6/2” с допущением в длинноволновой части спектра.

Согласно данным [1], [3–4], [20–34], а также их обобщению (см. введение) можно предположить, что все образцы (разных авторов), поверхность которых была подготовлена (отшлифована и отполирована) не лежали более 2–3 суток. Вероятно, эксперименты были проведены при “активированной поверхности”. Иными словами, такая поверхность создает эффект дополнительного участка поглощения, и именно это значение было принято авторами за истинную ширину запрещенной зоны.

Однако, по прошествии 2–3 суток очувствление коротковолновой области релаксирует и остается стабильный во времени участок поглощения вблизи значения энергии 1,30 эВ.

Таким образом, для аппроксимации целесообразно использовать еще один член, зависящий от $E_g = 1,30$ эВ. Иными словами, будем рассуждать, что в “активированном (очувствленном) состоянии” образец сочетает свойства сразу двух материалов с ширинами запрещенных энергий 1,30 эВ и 1,34 эВ. Тогда зависимость примет следующий вид (см. рис. 6):

$$\alpha(\hbar\omega) = C_0(\hbar\omega - E_{g0})^{3/2} C_1(\hbar\omega - E_{g1})^{3/2} + C_2(\hbar\omega - E_{yp})^{80/2}, \quad (8)$$

где $C_0 = \text{const} = 13000$,

$C_1 = \text{const} = 1800\,000$,

$C_2 = \text{const} = 11000$,

$E_{g0} = 1,300$ эВ,

$E_{g1} = 1,346$ эВ,

$E_{yp} = 0,49$ эВ,

$\lg(\sigma) = 7,066$.

Как видим, такой подход дает ощутимо лучшие результаты.

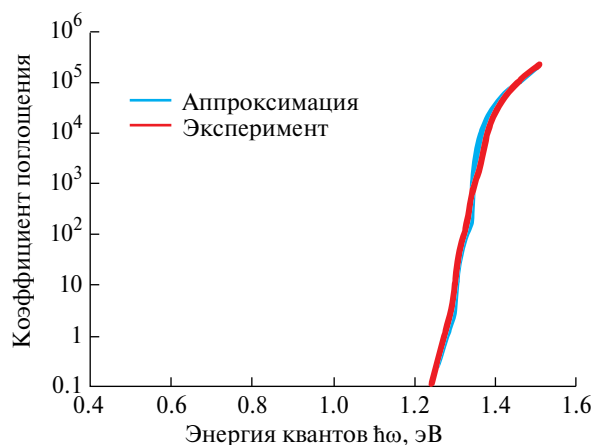


Рис. 6. Аппроксимация коэффициента поглощения InP: Si для двух областей поглощения (1.3 эВ и 1.346 эВ) с допущением в длинноволновой части спектра.

Неплохие результаты дает также предположение о наличии еще одной полосы поглощения около 1.25 эВ. Можно предположить, что здесь происходит слабое, но быстрорастущее поглощение за счет, например, переходов электронов из валентной зоны на мелкие примесные донорные уровни, или же вероятен более сложный механизм поглощения с участием глубоких уровней. В этом случае, будем отталкиваться от 3-х линий поглощения: 1.25; 1.3 и 1.36 эВ, тогда (см. рис. 7):

$$\alpha(\hbar\omega) = C_{00}(\hbar\omega - E_{00})^{3/2} C_0(\hbar\omega - E_{g0})^{3/2} + C_0(\hbar\omega - E_{g1})^{3/2}, \quad (9)$$

где $C_{00} = \text{const} = 700$,

$C_0 = \text{const} = 38000$,

$C_1 = \text{const} = 2200\,000$,

$E_{00} = 1,25$ эВ,

$E_{g0} = 1,30$ эВ,

$E_{g1} = 1,36$ эВ,

$\lg(\sigma) = 7,683$.

Кроме визуального сравнения, для понимания качества аппроксимации, нами использовался параметр десятичный логарифм от среднеквадратического отклонения, определяемый по формуле:

$$\lg(\sigma) = \lg \left[\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\alpha_{\text{эксп.}i} - \alpha_{\text{аппр.}i})^2}{N}} \right], \quad (10)$$

где $\lg(\sigma)$ — десятичный логарифм σ ,

σ — среднеквадратическое отклонение,

$\alpha_{\text{эксп.}i}$ — i -ое экспериментальное значение коэффициента поглощения,

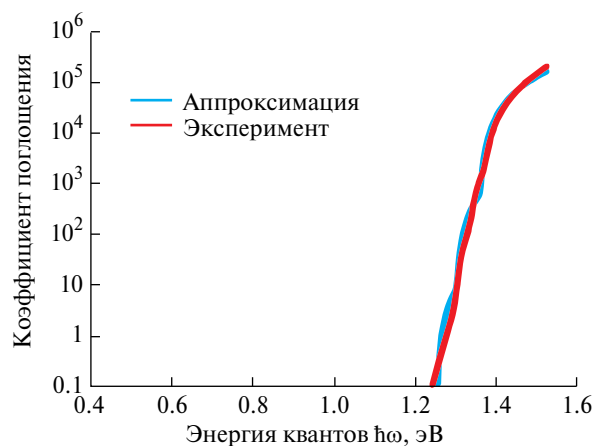


Рис. 7. Аппроксимация коэффициента поглощения InP: Si для линий (1.25; 1.3 и 1.36 эВ).

$\alpha_{\text{аппр.}i}$ — i -ое аппроксимированное значение коэффициента поглощения,

N — количество экспериментальных значений коэффициента поглощения, в нашем случае равно 88.

Предпочтение параметра $\lg(\sigma)$ вместо самого σ , связано с тем фактом, что коэффициент поглощения α меняется очень резко более чем на 6 порядков при изменении энергии квантов ($\hbar\omega$) всего на 0,3 эВ. По этой же причине в графиках (на рис. 3–7) применяется логарифмическая шкала для оси ординат.

Отметим, также, что при построении графиков формул 5, 6, 8, 9 бралась только действующая часть (Re) комплексного числа. Иными словами, для случая, когда энергия излучения $\hbar\omega \leq E_g$ (формулы 5–6), а также, $\hbar\omega \leq E_{g0}$ и $\hbar\omega \leq E_{g1}$ (формула 8), ставилось условие, что $(\hbar\omega - E_g) = 0$, $(\hbar\omega - E_{g0}) = 0$, $(\hbar\omega - E_{g1}) = 0$, соответственно. (Для формулы 9, ситуация аналогичная). Собственно говоря, такое же условие ставилось и для формулы 7, с целью отсечки отрицательных значений.

3. ПРИМЕНЕНИЕ АППРОКСИМИРОВАННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СПЕКТРА СОБСТВЕННОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ InP: Cu

В работах [1], [3–4] описывалась аппроксимация спектра фотопроводимости InP: Cu в области фундаментальных поглощений с ее особенностью, проявляющейся в виде двойного максимума зависимости. Формула [3–4] опиралась на эмпирическую спектральную зависимость поглощения. Для получения полной аналитической формулы имеет смысл перенести вышеполученную нами аппроксимацию и проанализировать полученные результаты.

В нашем случае [1], [3–4]:

$$\begin{aligned} I_{\Phi}(\alpha(\hbar\omega)) = & Q_1 \cdot [1 - \exp(-\alpha t_1)] + \\ & + Q_2 \cdot \exp(-\alpha t_1) \cdot [1 - \exp(-\alpha t_2)] + \\ & + Q_3 \cdot \exp(-\alpha t_1) \cdot \exp(-\alpha t_2) \cdot [1 - \exp(-\alpha t_3)] + \\ & + Q_4 \cdot \exp(-\alpha t_1) \cdot \exp(-\alpha t_2) \cdot \exp(-\alpha t_3) \times \\ & \times [1 - \exp(-\alpha(d - t_1 - t_2 - t_3))], \end{aligned} \quad (11)$$

где $I_{\Phi}(\alpha)$ — фотопроводимость исследуемого образца InP: Cu [1], [3–4], как функция от коэффициента поглощения;

$\alpha(\hbar\omega)$ — коэффициент поглощения, как функция от энергии фотонов подаваемого на образец излучения;

Q_i — коэффициент, пропорциональный времени жизни для каждого слоя;

i — номер слоя (i принимает значения: 1,2,3,4);

t_i — толщина слоя;

d — толщина образца ($d = 1775$ мкм).

Таблица 1.

Рис.	Q_1 норм	Q_2 норм	Q_3 норм	Q_4 норм	t_1 , мкм	t_2 , мкм	t_3 , мкм
8	13.23	41.818	7.378	143.598	0.03327	0.8347	200
9–12	13.23	41.818	7.378	143.598	0.1943	21.43	200

Теперь подставим 5 аналитических зависимостей (формулы 5–9) в выражение 11. Представим поочередно полученные зависимости (рис. 8–12).

Параметры аппроксимации представлены в табл. 1.

Отметим, что, в данном случае, нами была применена программа согласно [1], [3–4], [20]. За основу были взяты параметры аппроксимации для эмпирически полученного коэффициента поглощения InP, но с заменой на представленные выше четыре аналитических варианта. Все коэффициенты менялись в ручном режиме (автоматическая подгонка была отключена, т.к. цель состояла в том, чтобы качественно показать наличие двух максимумов, при этом не меняя коэффициентов, или почти не меняя). Изменение значений параметров t_1 и t_2 пришлось сделать только для самой первой и неудачной аппроксимации (рис. 3). Тем не менее, даже для этого допущения толщины слоев составляют 332.7 Å и 8347 Å, что имеет физический смысл и не противоречит модели [1], [3–4]. Результаты аппроксимации полностью укладываются в рамки положения экспериментальных спектров согласно [1].

В рисунки 8–12 был добавлен нормированный экспериментальный результат спектра фотопроводимости InP: Cu, полученный [1], [3–4]. Для каждого из четырех случаев, аналогично самому коэффициенту поглощения (рис. 3–7) было определено среднеквадратичное отклонение по формуле 12

$$\sigma_{\Phi} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M (I_{\Phi, \text{эксп.}j} - I_{\Phi, \text{аппр.}j})^2}{M}}, \quad (12)$$

где σ_{Φ} — среднеквадратическое отклонение,

$I_{\Phi, \text{эксп.}j}$ — j -ое экспериментальное нормированное значение фотопроводимости InP: Cu,

$I_{\Phi, \text{аппр.}j}$ — j -ое аппроксимированное нормированное значение фотопроводимости InP: Cu,

M — количество экспериментальных значений фотопроводимости InP: Cu, в нашем случае равно 1132.

Среднеквадратичное отклонение при полной аппроксимации фотопроводимости составило: 20.525; 19.623; 21.597; 9.029 и 12.042 соответственно.

Как видим, из рисунков 6 и 10, и на основании сравнения среднеквадратичных отклонений, наше предположение о “двойственности” области

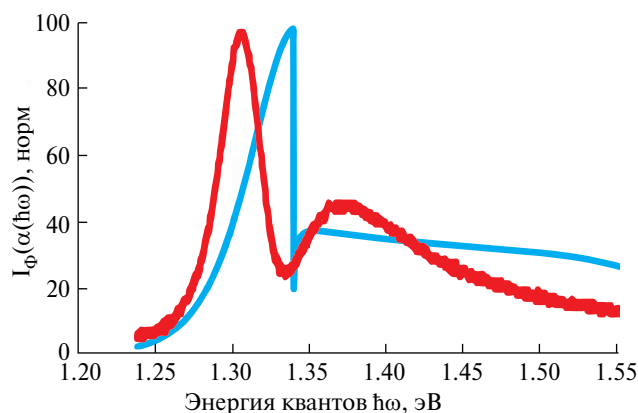


Рис. 8. Аналитический спектр фотопроводимости образца InP: Cu исходя из представления “Прямых разрешенных переходов”.

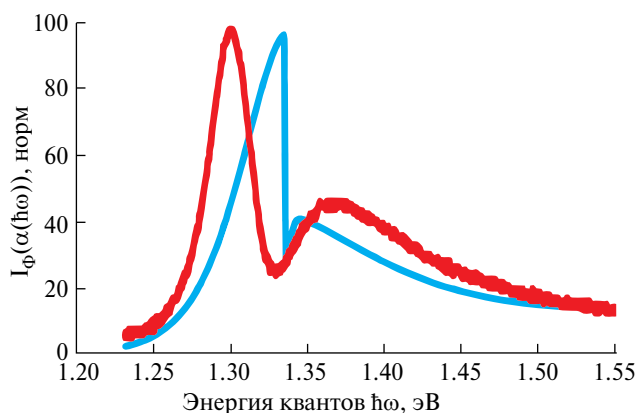


Рис. 9. Аналитический спектр фотопроводимости образца InP: Cu исходя из представления “Прямых запрещенных переходов”.

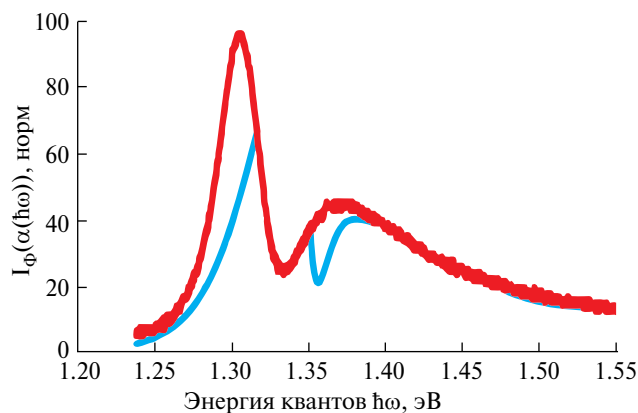


Рис. 10. Аналитический спектр фотопроводимости образца InP: Cu для степени “6/2”.

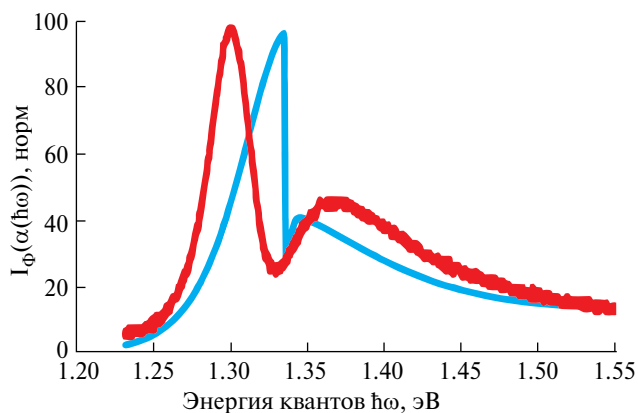


Рис. 11. Аналитический спектр фотопроводимости образца InP: Cu для двух областей поглощения (1.3 эВ и 1.346 эВ).

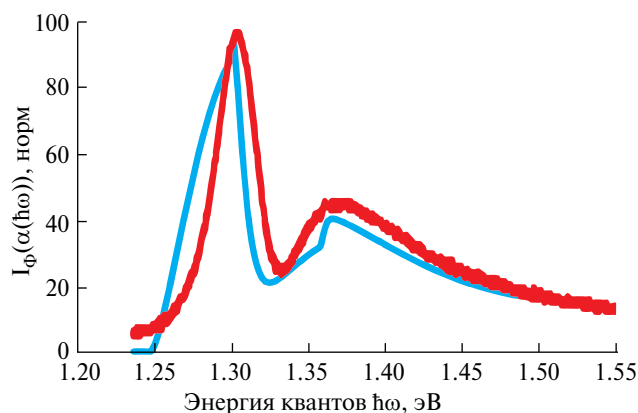


Рис. 12. Аналитический спектр фотопроводимости образца InP: Cu для линий (1.25; 1.3 и 1.36 эВ).

фундаментального поглощения оправдано, и дает наиболее точные результаты аппроксимации.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СПОСОБНОСТИ СОХРАНЕНИЯ ЭФФЕКТА ОЧУВСТВИЕНИЯ INP: CU

Согласно источникам [1], [3–4] после механического воздействия абразивом эффект очувствления (образование дополнительного высокоэнергетического максимума 1.35–1.36 эВ) сохраняется до двух суток. Однако процесс является сложным, состоящим из двух экспонент, и описывается следующим выражением

$$I_{\phi}(t) = A \cdot e^{-t/\alpha} + B \cdot e^{-t/\beta}, \quad (13)$$

где $I_{\phi}(t)$ — фотопроводимость (вблизи дополнительного высокоэнергетического максимума), как функция от времени состаривания образца;

t — время, ч.,

A, B — коэффициенты перед экспонентами, отн.ед.,

α, β — времена релаксации, ч.

Времена релаксаций α, β составили, согласно [1], 2,63 и 50 ч, соответственно.

При аппроксимации всех экспериментальных результатов исследуемого образца был сделан вывод, что при релаксации мех. напряжений со временем меняются только два коэффициента (см. формулу 10) Q_1 и Q_2 . Иными словами только $Q_1(t)$ и $Q_2(t)$ являются функциями времени. Q_3 и Q_4 — константы.

Закон изменения аналогичен:

$$Q_1(t) = Q_{01} \times (C \cdot e^{-t/\gamma} + D \cdot e^{-t/\xi}), \quad (14)$$

$$Q_2(t) = Q_{02} \times (G \cdot e^{-t/\chi} + H \cdot e^{-t/\varsigma}), \quad (15)$$

где $Q_1(t)$ — коэффициент, пропорциональный времени жизни носителей заряда в слое № 1 образца (как функция от времени состаривания образца);

$Q_2(t)$ — коэффициент, пропорциональный времени жизни носителей заряда в слое № 2 образца (как функция от времени состаривания образца);

Q_{01} — начальное нулевое значение, соответствующее результатам аппроксимации ($Q_{1\text{норм}}$, табл. 1);

Q_{02} — начальное нулевое значение, соответствующее результатам аппроксимации ($Q_{2\text{норм}}$, табл. 1);

t — время, ч;

C, D — коэффициенты (для слоя № 1) перед экспонентами (нормированы таким образом, что их сумма в начальный момент времени равна 1);

G, H — коэффициенты (для слоя № 2) перед экспонентами (нормированы таким образом, что их сумма в начальный момент времени равна 1);

γ, ξ — времена релаксации (для слоя № 1), ч;

χ, ς — времена релаксации (для слоя № 2), ч.

Приведем в табл. 2 и 3 необходимые для вычисления константы.

Таблица 2.

Q_{01}	C	D	γ	ξ
13.23	0.742564	0.257436	2.63	32.26

Таблица 3.

Q_{02}	G	H	χ	ς
41.818	0.646752	0.353248	2.63	40

Таким образом, можно подставить зависимости 14 и 15 в формулу 11. Получим следующее.

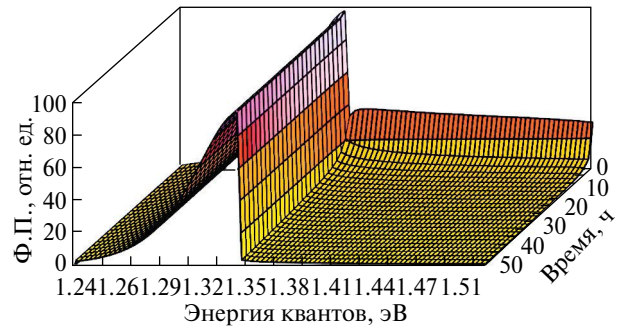


Рис. 13. $I_F(\alpha(\hbar\omega), t)$ InP: Cu исходя из представления “Прямых разрешенных переходов”.

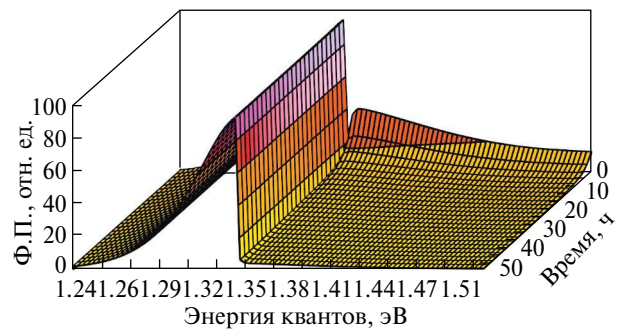


Рис. 14. $I_F(\alpha(\hbar\omega), t)$ InP: Cu исходя из представления “Прямых запрещенных переходов”.

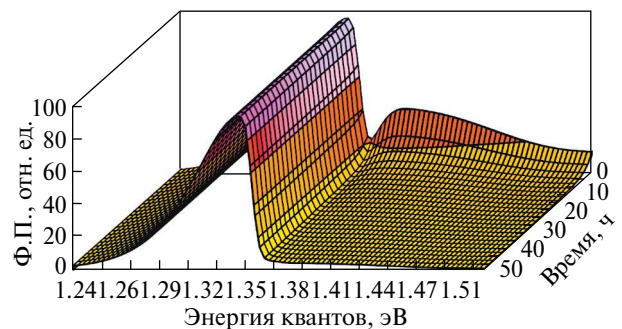


Рис. 15. $I_F(\alpha(\hbar\omega), t)$ для степени “6/2”.

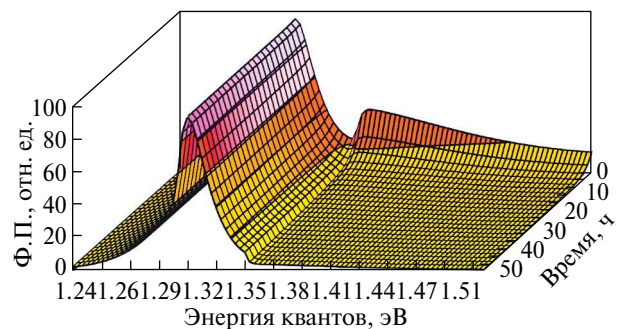


Рис. 16. $I_F(\alpha(\hbar\omega), t)$ InP: Cu для двух областей поглощения (1.3 эВ и 1.346 эВ).

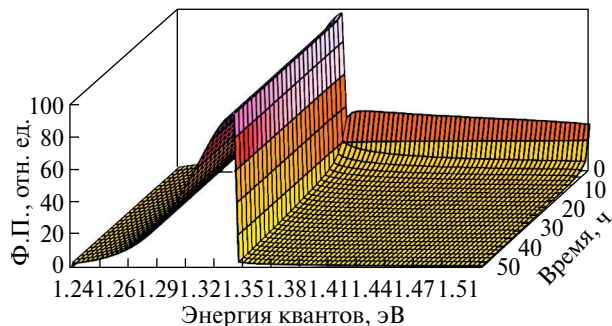


Рис. 17. $I_\phi(\alpha(\hbar\omega), t)$ InP: Cu для линий (1.25; 1.3 и 1.36 эВ).

$$\begin{aligned}
 I_\phi(\alpha(\hbar\omega), t) = & Q_{01} \times (C \cdot e^{-t/\gamma} + D \cdot e^{-t/\xi}) \times \\
 & \times [1 - \exp(-\alpha t_1)] + \\
 & + Q_{02} \times (G \cdot e^{-t/\chi} + H \cdot e^{-t/\zeta}) \cdot \exp(-\alpha t_1) \cdot [1 - \exp(-\alpha t_2)] + \\
 & + Q_3 \cdot \exp(-\alpha t_1) \cdot \exp(-\alpha t_2) \cdot [1 - \exp(-\alpha t_3)] + \\
 & + Q_4 \cdot \exp(-\alpha t_1) \cdot \exp(-\alpha t_2) \cdot \exp(-\alpha t_3) \times \\
 & \times [1 - \exp(-\alpha(d - t_1 - t_2 - t_3))]. \quad (16)
 \end{aligned}$$

Аналогично графикам на рис. 8–12 построим функции двух переменных (см. рис. 13–17) для 5 вариантов аппроксимации $\alpha(\hbar\omega)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя полученные результаты, отметим, что вариант аппроксимации фотопроводимости InP: Cu, как функции от спектральной зависимости коэффициента поглощения (от энергии фотонов излучения), полагая, что последний, определяющийся двойным механизмом: фундаментального ($\approx 1,30$ эВ) и квазифундаментального ($\approx 1,35$ эВ), наиболее предпочтителен с точки зрения физического понимания механизмов поглощения световой энергии (механическое воздействие создает временный (до 2-х суток) эффект “увеличения” зоны запрещенных энергий в поверхностном слое (до 21 мкм), что ощутимо для коротковолновой части излучения, и сохраняется классический стационарный механизм поглощения света объемом кристалла), а также, дает наиболее точные математические результаты (для коэффициента поглощения логарифмическая зависимость среднеквадратичного отклонения $\lg(\sigma)$ минимальна и равна 7.066; и для описания фотопроводимости среднеквадратичное отклонение σ_ϕ минимально и равно 9.029).

Как видим, следующие изыскания могут быть направлены на объяснение высокой степени нарастания фотопроводимости в коротковолновой области, а также исследования способов воздействия на поверхностный слой InP: Cu, с целью ее очувствления.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящая статья посвящается светлой памяти д.ф.-м.н. Прибылову Николаю Николаевичу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаренко Ф.В. Особенности спектров собственной фотопроводимости в высокоомном фосфиде индия с примесями Cu и Fe [Текст]: дис. ... канд. физ. — мат. наук: 01.04.07: защищена 23.12.08 / Ф.В. Макаренко. Воронеж, 2008. 161 с. Библиогр.
2. Мельник В.А. Влияние комбинированного возбуждения на фотопроводимость фосфида индия, компенсированного медью [Текст]: дис. ... канд. физ. — мат. наук: 01.04.07: защищена 02.12.08 / В.А. Мельник. Воронеж, 2008. 127 с. Библиогр.
3. Особенности спектров собственной фотопроводимости в фосфиде индия, компенсированном медью / Ф.В. Макаренко, Н.Н. Прибылов, С.И. Рембеза, В.А. Мельник // ФТП. 2008. Т. 42. № 5. С. 542–545.
4. Specific features of intrinsic photoconductivity spectra of cooper-compensated indium phosphide / Ph.V. Makarenko, S.I. Rembeza, V.A. Mel'nik, N.N. Pribylov // Semiconductors. 2008. Т. 42. № 5. С. 528–530.
5. Прибылов Н.Н., Рембеза С.И., Сустретов А.А. Амфотерное поведение меди в фосфиде индия. // ФТП. 1994. Т. 28. Вып. 3. С. 467–471.
6. Ковалевская Г.Г., Клотыньш Э.Э., Наследов Д.Н., Слободчиков С.В. Некоторые электрические и фотоэлектрические свойства InP, легированного медью. // ФТТ, 1966. Т. 8. Вып. 8. С. 2415–2419.
7. Ковалевская Г.Г., Наследов Д.Н., Сиукаев Н.В., Слободчиков С.В. Спектральная фоточувствительность InP n-типа. // ФТТ, 1966. Т. 8. Вып. 2. С. 475–477.
8. Кирсон Я.Э., Клотыньш Э.Э., Крумина Р.К. Компенсация доноров в фосфиде индия медью // ФТП, 1988. Т. 22. Вып. 3. С. 565. Деп. в ВНИИ-ТИ, № Р-4319/87.
9. Негрескул В.В., Руссу Е.В., Радауцан С.И., Чебан А.Г. Излучательная рекомбинация в легированных кристаллах фосфида индия // ФТП, 1975. Т. 9. Вып. 5. С. 893–900.
10. Дахно А.Н., Емельяненко О.В., Лагунова Т.С., Метревели С.Г. Влияние компенсации на проводимость по примесям в n-InP при промежуточном легировании. // ФТП. 1976. Т. 10. Вып. 4. С. 677–682.
11. Витовский Н.А., Лагунова Т.С., Рахимов О. Взаимодействие точечных собственных дефектов в фосфидах индия n-типа со скоплениями акцепторов. // ФТП. 1984. Т. 18. Вып. 9. С. 1624–1628.
12. Ковалевская Г.Г., Алюшина В.И., Слободчиков С.В. О низкочастотных колебаниях тока в In P. // ФТП. 1975. Т. 9. Вып. 11. С. 2125–2128.
13. Kullendorff N., Jansson L., Ledebor L.-A. Copper-related deep level defects in III–V semiconductors // J. Appl. Phys. 1983. V. 56. N 6. P. 3203–3212.
14. Skolnick M.S., Dean P.J., Pitt A.D., Uihlein Ch., Krath H., Deveaud B., Foulkes E.J. Optical properties of copper-related centers in In P. // J. Phys. C: Sol. St. Phys. 1983. V. 16. P. 1967–1985.

15. *Jyh-Chwen Lee, Milnes A.G., Schlesinger T.E.* Quenching of band-edge photoluminescence in InP by Cu. // *Phys. Rev.B.* 1986. V. 34. N 10. P. 7385–7387.
16. Сушков С.А. Примесные состояния меди в фосфиде индия. Автореф. канд. дисс. Воронеж, 1999.
17. Москвичев А.В. Эффекты инфракрасного гашения и сенсификации собственной фотопроводимости в фосфидах галлия и индия, легированных медью. Автореф. канд. дисс. Воронеж, 2002.
18. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем: Учеб. пособие для студентов вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1979. 367 с., ил.
19. Мельник В.А., Прибылов Н.Н., Макаренко Ф.В., Рембеза С.И. Влияние примесного излучения на собственную фотопроводимость фосфида индия, компенсированного медью // О 62 Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Труды X международной конференции. Ульяновск: УлГУ, 2008. С. 52
20. Анализ спектров фотопроводимости полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ / Ф.В. Макаренко, К.В. Зольников, В.А. Скляр, А.В. Ачкасов // Моделирование систем и процессов. Воронеж, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2015. Т. 8. № 2. С. 17–18.
21. Исследование влияния силы тока на изменение длины волны, соответствующей максимуму излучения индикатора красного цвета свечения / Ф.В. Макаренко, М.И. Черных, К.В. Зольников, В.Н. Макаренко // Моделирование систем и процессов. Воронеж, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. 2018. Т. 11. № 3. С. 39–44.
22. Сужение спектра излучения GaAs светодиода за счет применения светофильтра InP (Ag) / Ф.В. Макаренко, А.В. Арсентьев, К.В. Зольников // Моделирование систем и процессов. Воронеж, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. 2020. Т. 13. № 4. С. 32–38.
23. Механизмы удаления оксидов с поверхности InP при прогреве в потоке мышьяка / Д.В. Дмитриев, Д.А. Колосовский, А.И. Торопов, К.С. Журавлев // Автоматрия. 2021. Т. 57, № 5. С. 11–17.
24. Агаев В.В. Электрические свойства эпитаксиальных пленок INP, выращенных на полуизолирующих подложках / В.В. Агаев, Г.И. Яблочкина, Ф.К. Агаева // Труды СКГМИ (ГТУ). 2022. № 29. С. 23–26.
25. Дрейманис Э.А., Кирсон Я.Э., Клотыньш Э.Э., Крумина Р.К. Изучение влияния меди на электрофизические свойства фосфида индия. // Изв. АН Латв.ССР: Сер. физ. и техн. н. 1986. № 2. С. 19–25.
26. Substitution of Phosphorus at the InP(001) Surface Upon Annealing in an Arsenic Flux / D.V. Dmitriev, D.A. Kolosovsky, E.V. Fedosenko [et al.] // *Semiconductors.* 2022.
27. TO-phonon anisotropies in a highly doped InP (001) grating structure / L.D. Espinosa-Cuellar, L.F. Lastras-Martínez, R.E. Balderas-Navarro [et al.] // *Applied Physics Letters.* 2021. V. 119. No. 14. P. 141102.
28. *Chen P.R.* Roles of alcohols and existing metal ions in surface chemistry and photoluminescence of InP cores / P.R. Chen, K.Y. Lai, H.S. Chen // *Materials Advances.* 2021. V. 2. No. 18. P. 6039–6048.
29. InP nanowire light-emitting diodes with different pn-junction structures / S. Kimura, H. Gamo, Y. Katsumi [et al.] // *Nanotechnology.* 2022. V. 33, No. 30. P. 305204.
30. Nanoengineering InP Quantum Dot-Based Photoactive Biointerfaces for Optical Control of Neurons / O. Karatum, R. Melikov, S.B. Srivastava [et al.] // *Frontiers in Neuroscience.* 2021. V. 15. No. APR. P. 652608.
31. Ультрамягкая рентгеновская эмиссионная и инфракрасная спектроскопии в исследовании функциональных наноразмерных пленок на InP / И.Я. Митова, К.А. Барков, В.А. Терехов [и др.] // Неорганические материалы. 2021. Т. 57, № 12. С. 1330–1336.
32. Новые материалы на основе систем InP-CdTe, CdS-CdTe. Их сравнительные свойства / И.А. Кировская, П.Е. Нор, А.О. Эккерт [и др.] // *Материаловедение.* 2023. № 1. С. 21–27.
33. Изготовление электрооптических модуляторов на основе InP для ВОЛС и проведение автоматизированного визуального контроля их поверхности на предмет наличия дефектов / Ю.А. Шурыгин, С.В. Ишуткин, Б.В. Ширяев, Ю.С. Жидик // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2022. Т. 25, № 3. С. 21–27.
34. Определение потока и энергии активации десорбции фосфора при отжиге в потоке мышьяка подложки InP(001) в условиях молекулярно-лучевой эпитаксии / Д.А. Колосовский, Д.В. Дмитриев, С.А. Пономарев [и др.] // *Физика и техника полупроводников.* 2022. Т. 56. № 7. С. 646–650.
35. Мощные СВЧ-фотодиоды на основе гетероструктур InAlAs/InGaAs, синтезируемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии / К.С. Журавлев, А.М. Гилинский, И.Б. Чистохин [и др.] // *Журнал технической физики.* 2021. Т. 91, № 7. С. 1158–1163.
36. Оптические и электронные свойства пассивированных поверхностей InP(001) / П.А. Дементьев, Е.В. Дементьева, Т.В. Львова [и др.] // *Физика и техника полупроводников.* 2021. Т. 55, № 8. С. 644–648.
37. Особенности спектров собственной фотопроводимости в фосфиде индия, легированном железом / Ф.В. Макаренко, Н.Н. Прибылов, В.А. Мельник // *Вестник ВГТУ.* 2007. Т. 3. № 11. С. 137–138.
38. Влияние обработки поверхности на фотопроводимость InP: Cu в собственной области / Ф.В. Макаренко, С.И. Рембеза, Н.Н. Прибылов, В.А. Мельник / Тез. докл. международной научной конф. “Актуальные проблемы физики твердого тела”, 23–26 октября 2007 г. Минск.: Изд-во БГУ, 2007. С. 85–86.
39. Моделирование релаксации дополнительного пика фотопроводимости InP: Cu / Ф.В. Макаренко, В.А. Мельник, А.А. Кожевников // Тез. докл. международной научной конф. “Компьютерные технологии в технике и экономике”, 21–22 мая 2007. Воронеж.: Изд.-во Междунар. ин-та компьют. технологий, 2007. С. 58–62.
40. Обработка спектров поглощения полупроводников, полученных на спектрометре СДЛ-2 / Плотникова Е.Ю., Макаренко Ф.В. // 49 научно-техническая конференция преподавателей и студентов ВГТУ “Микроэлектроника” Секция № 1 “Физические

- свойства материалов и элементов электронной техники” Воронеж 20–23 апреля 2009 г. С. 16.
41. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов (М., Мир, 1984) кн. 2, с. 341
 42. Суэмацу Я., Катаока С., Кисино К., Кокубун Я., Судзуки Т., Исии О., Енэдзава С. Основы оптоэлектроники: Пер. с яп. — М.: Мир, 1988. О75288 с., ил. с. 89
 43. Потапович Н.С. Фотоэлектрические преобразователи узкополосного излучения на основе гетероструктур InGaAsP/InP / Н.С. Потапович, М.В. Нахимович, В.П. Хвостиков // Физика и техника полупроводников. 2021. Т. 55, № 11. С. 1091–1094.
 44. Взаимосвязь электронной и атомной структуры пассивированных поверхностей n-InP(100) / М.В. Лебедев, Т.В. Львова, А.Н. Смирнов [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2022. Т. 56, № 7. С. 659–666.
 45. Мордвинова Н.Е. Коллоидные квантовые точки фосфида индия, легированные цинком [Текст]: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.01: защищена 03.03.17 / Н.Е. Мордвинова. Москва, 2017. 158 с. Библиогр.
 46. Moss T.S. Semiconductor Opto-Electronics [Текст]: учеб.-моногр. пособие (исправленное) / T.S. Moss, G.J. Burrell, B. Ellis. Оксфорд, 2013. 454 с.
 47. Агекян В.Ф. Основы фотоники полупроводниковых кристаллов и наноструктур [Текст]: учеб.-мет. пособие / В.Ф. Агекян; Санкт-Петербургский гос. ун-т, Физ. фак., Каф. физики твердого тела. Санкт-Петербург: Соло, 2007. 132 с.
 48. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников [Текст]: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по физическим и техническим направлениям и специальностям / А.И. Ансельм. Изд. 3-е, стер. Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2008. 618 с.

Approximation of the Absorption Spectrum of Indium Phosphide in the Context of Simulation of the Process of Sensitivity Enhancement

© 2024 Ph. V. Makarenko*, V. K. Zolnikov, A. I. Zarevich,
N. Yu. Zalenskaya, A. V. Poluektov

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov (VSUFT), Voronezh, Russia

**E-mail: philipp@mail.ru*

Examines the fundamental rights of Phosphide of India, legitimized by Tellur and, in the last resort, compensated for. Data on the composition of four high-quality images of the InP: Cu photoelectronic spectrum are presented in the individual layers. The work is characterized by the semi-empiric approach to photoconduction of InP: Cu oxide films. It is concluded that the photoresistance $I_{ph}(\alpha(\hbar\omega))$ was analytically approximated as the function of the experimental-complete spectral distribution of the coefficient phosphorus india. It is proposed to use five approximating functions with the aim of analyzing the coefficient of absorption of Indian phosphorus $\alpha(\hbar\omega)$. Completed 5 locations with different signs of median isolation. On the basis of analytical amplitudes, the complete analytical amplitude $I_{ph}(\alpha(\hbar\omega))$ is modelled. Analogously, five conclusions were drawn that indicate a sign of median isolation. Five non-stationary measures of IF photometry have been taken (as two functions: co-efficiency of exposure, as photo energy functions, and time-consuming observations) in normal situations. The answer to the question is the most mathematical and physical solution of the proximate function $\alpha(\hbar\omega)$. Obviously, it shows that this the degree of variance is optimal for its implementation (inclusion of this degree of variance in the structure $I_{ph} = f(\alpha)$ and $\alpha = f(\hbar\omega)$) of the complete analytical description of the process photoconductivity. It should be noted that subsequent research may be based on the establishment of physical bases of photoconductivity in the short wave of fundamental transfers of phosphorus from India, as well as research into the properties of air on the high InP: Cu layer, with its stability and stability.

Keywords: Phosphorus from India, aproximity, coefficient of concentration, photoconductivity, deep effects, powerful effects, medial isolation, spectacular maxima, dispersion

REFERENCES

1. *Makarenko, Ph.V.* Characteristics of the species of congeneric photodetector in the highly concentrated form of India with the help of Su and Fe [Text]: dis. ...cand. phys. — mat. science: 01.04.07: protected 23.12.08 / Ф.В. Макаренко. Voronezh, 2008. 161 p. Bibliographer.
2. *Melnik, V.A.* Description of the combined exhibition on the photometry of phosphite from India, composed of metal [Text]: dis. ...cand. phys. mat. science: 01.04.07: protected 02.12.08 / V.A. Melnik. Voronezh, 2008. 127 p. Bibliographer.
3. Characteristics of the observations of the individual photometry in Phosphide India, compensated by the media / Ф.В. Макаренко, N.N. Pribylov, S.I. Rembessa, V.A. Melnik // FTP. 2008. T. 42. No. 5. C. 542–545.
4. Specific features of intrinsic photoconductivity spectra of cooper-compensated indium phosphide / Ph.V. Makarenko, S.I. Rembeza, V.A. Mel'nik, N.N. Pribylov // Semiconductors. 2008. T. 42. No. 5. C. 528–530.
5. *Subjects N.N., Rembesa S.I., Sustretov A.A.* Amphoteric medicine presentation in Phosphide India. // FTTP. 1994. T. 28. Vyp. 3. C. 467–471.
6. *Kovalevskaya G.G., Clotynsh E.E., Nasledov D.N., Slobodchikov S.V.* Some electric and photoelectric components of the InP alloy. // FT. 1966. T. 8 Volume 8. P. 2415–2419.
7. *Kovalevskaya G.G., Nasledov D.N., Siukaev N.V., Slobodchikov S.V.* Spectral photochromism InP n-type. // FT. 1966. T. 8. Volume 2. P. 475–477.
8. *Kirson Y.E., Clotynsh E.E., Krumina R.K.* Compensation of donors in Phosphide Indian metal // FTP. — 1988. — T.22. — Вып.3. — с. 565. — Deep. in VINNI-TI, No. R-4319/87.
9. *Negrescul V.V., Russu E.V., Radaucan S.I., Cheban A.G.* Exceptional recombination in the legionary crystals of phosphite from India // FTP — 1975 — T.9 — Volume 5 — p. 893–900.
10. *Dahno A.N., Emelyanenko O.V., Lagonova T.S., Metreveli S.G.* Increase in compensation for monthly losses in n-InP during the course of the legation process. // FTTP. — 1976. — T.10. — Вып.4. — с. 677–682.
11. *Vitovsky N.A., Lagonov T.S., Rahimov O.* Integration of point-related defects in the n-type phosphides of India with the help of actors. // FTTP. — 1984. — T. 18 — Volume 9 — c.1624–1628.
12. *Kovalevskaya G.G., Alyushina V.I., Slobodchikov S.V.* On low-frequency voltage conversions in In P. // FTP — 1975 — T.9 — Volume 11 — p. 2125–2128.
13. *Kullendorff N., Jansson L., Ledebor L-A.* Copper-related depp level defects in III–V semiconductors // J. Appl. Phys. — 1983 — Vol.56 — N.6 — p.3203–3212.
14. *Skolnick M.S., Dean P.J., Pitt A.D., Uihlein Ch., Krath H., Deveaud B., Foulkes E.J.* Optical properties of copper-related centers in In P. // J. Phys.C: Sol. St.Phys. — 1983. — Vol.16. — p.1967–1985.
15. *Jyh-Chwen Lee, Milnes A.G., Schlesinger T.E.* Quenching of band-edge photoluminescence in InP by Cu. // Phys. Rev.B — 1986 — Vol.34 — N.10 — p.7385–7387.
16. *Sushkov S.A.* Initial concentrations of medicine in Phosphide India. — Authorref. cand. diss. Voronezh, 1999.
17. *Moskvich A.V.* Effects of infrared sensitisation and sensitivity to infectious photosensitivity in the Phosphides of Gallia and India, legitimized metals. — Authorref. cand. diss. Boronezh, 2002.
18. *Kurnosov A.I., Yudin V.V.* Production technology of semi-conductor and integral microcircuits: University. questions for students of science. 2nd from, pereab. and add. — M.: High. school, 1979. — 367 p., il.
19. *Melnik V.A., Pribylov N.N., Makarenko F.V., Rembes S.I.* The aim of the study is to investigate the photodynamic therapy of phosphorus in India, compensating for the loss of metals \\ Of 62 optics, nanoelectronics, nanotechnology and microsystems: Works X international conference. — Ulyanovsk: ULG, 2008 — p. 52
20. Analysis of photoconductive properties of semi-connected AIIIBV units / Ф.В. Макаренко, K.V. Zolnikov, V.A. Sklear, A.V. Akkasov // Modeling of systems and processes. — Voronezh, the Voronezh State Forest Engineering University is located there. Г.Ф. Морозова, — 2015. — T.8. — No. 2. — C. 17–18.
21. The use of voltage fluctuations in wave length, resulting in the maximum illumination of the red color candle indicator / Ф.В. Макаренко, M.I. Chernykh, K.V. Zolnikov, V.N. Makarenko // Modeling of systems and processes. — Voronezh, the Voronezh State Forest Engineering University is located there. Г.Ф. Морозова. — 2018. — T. 11. — No. 3. — C. 39–44.
22. Study of the spectrum of GaAs LEDs compared to the use of InP (Ag) light filters / Ф.В. Макаренко, A.V. Arsentiev, K.V. Zonaldry // Modeling of systems and processes. — Voronezh, the Voronezh State Forest Engineering University is located there. Г.Ф. Морозова. — 2020. — T. 13. — No. 4. — C. 32–38.
23. Mechanisms of removal of oxides from the InP range when heating in a mouse pad / D.B. Dmitriev, D.A. Kolosovsky, A.I. Toropov, K.C. Zhuravlev // Autometry. — 2021. — T. 57, No. 5. — C. 11–17.
24. *Agae, V.B.* Electricity of INP epitaxial films grown on semi-insulated surfaces / V.B. Agaev, Г.И. Yablochkina, F.K. Agaeva // Workers of the SKGMI (GTU). — 2022. — No. 29. — C. 23–26.
25. *Dreimanis E.A., Kirson Y.E., Clotynsh E.E., Krumina R.K.* Study of the properties of metals in electrophysical systems of phosphorus and
25. *Dreimanis E.A., Kirson J.E., Klotins E.E., Krumina R.K.* Study of the influence of copper on the electrical properties of indium phosphide. // Izv. Academy of Sciences of the Latvian SSR: Ser. physical and tech. n. — 1986. — No. 2 — p. 19–25.
26. Substitution of Phosphorus at the InP(001) Surface Upon Annealing in an Arsenic Flux / D.V. Dmitriev, D.A. Kolosovsky, E.V. Fedosenko [et al.] // Semiconductors. — 2022.
27. TO-phonon anisotropies in a highly doped InP (001) grating structure / L.D. Espinosa-Cuellar, L.F. Lastaras-Martínez, R.E. Balderas-Navarro [et al.] // Applied Physics Letters. — 2021. — Vol. 119, No. 14. — P. 141102.
28. *Chen, P.R.* Roles of alcohols and existing metal ions in surface chemistry and photoluminescence of InP cores / P.R. Chen, K.Y. Lai, H.S. Chen // Materials Advances. — 2021. — Vol. 2, No. 18. — P. 6039–6048.
29. InP nanowire light-emitting diodes with different pn-junction structures / S. Kimura, H. Gamo, Y. Katsumi [et al.] // Nanotechnology. — 2022. — Vol. 33, No. 30. — P. 305204.

30. Nanoengineering InP Quantum Dot-Based Photoactive Biointerfaces for Optical Control of Neurons / O. Karatum, R. Melikov, S.B. Srivastava [et al.] // *Frontiers in Neuroscience*.— 2021.— Vol. 15, No. APR.— P. 652608.
31. Ultrasoft X-ray emission and infrared spectroscopy in the study of functional nano-sized films on InP / I. Ya. Mitova, K.A. Barkov, V.A. Terekhov [et al.] // *Inorganic materials*.— 2021.— T. 57, No. 12.— P. 1330–1336.
32. New materials based on InP-CdTe, CdS-CdTe systems. Their comparative properties / I.A. Kirovskaya, P.E. Nor, A.O. Eckert [et al.] // *Materials Science*.— 2023.— No. 1.— P. 21–27.
33. Manufacturing of electro-optical modulators based on InP for fiber optic links and carrying out automated visual inspection of their surface for defects / Yu.A. Shurygin, S.V. Ishutkin, B.V. Shiryaev, Yu.S. Zhidik // *Reports of the Tomsk State University University of Control Systems and Radioelectronics*.— 2022.— T. 25, No. 3.— P. 21–27.
34. Determination of the flux and activation energy of phosphorus desorption during annealing of an InP(001) substrate in an arsenic flow under molecular beam epitaxy conditions / D.A. Kolosovsky, D.V. Dmitriev, S.A. Ponomarev [etc.] // *Physics and technology of semiconductors*.— 2022.— T. 56, No. 7.— P. 646–650.
35. Powerful microwave photodiodes based on InAlAs/InGaAs heterostructures synthesized by molecular beam epitaxy / K.S. Zhuravlev, A.M. Gilinsky, I.B. Chistokhin [et al.] // *Journal of Technical Physics*.— 2021.— T. 91, No. 7.— P. 1158–1163.
36. Optical and electronic properties of passivated InP(001) surfaces / P.A. Dementyev, E.V. Dementyeva, T.V. Lvova [et al.] // *Physics and technology of semiconductors*.— 2021.— T. 55, No. 8.— P. 644–648.
37. Features of intrinsic photoconductivity spectra in indium phosphide doped with iron / F.V. Makarenko, N.N. Pribylov, V.A. Melnik // *Bulletin of VSTU*.— 2007.— T. 3.— No. 11.— p. 137–138.
38. Effect of surface treatment on the photoconductivity of InP: Cu in its own region / F.V. Makarenko, S.I. Rembeza, N.N. Pribylov, V.A. Melnik // *Tez. report international scientific conference “Current problems of solid state physics”, October 23–26, 2007* — Minsk.: BSU Publishing House, 2007.— p. 85–86.
39. Modeling of relaxation of an additional peak of photoconductivity of InP: Cu / F.V. Makarenko, V.A. Melnik, A.A. Kozhevnikov // *Abstracts. report international scientific conference “Computer technologies in engineering and economics”, May 21–22, 2007*.— Voronezh.: Publishing House International. Institute of Computers. technologies, 2007.— p. 58–62.
40. Processing of absorption spectra of semiconductors obtained on the SDL-2 spectrometer / Plotnikova E. Yu., Makarenko F.V. // 49 scientific and technical conference of teachers and students of VSTU “Microelectronics” Section No. 1 “Physical properties of materials and elements of electronic equipment” Voronezh April 20–23, 2009 P. 16.
41. *S. Zee. Physics of semiconductor devices* (M., Mir, 1984) book. 2, p. 341
42. *Suematsu Y., Kataoka S., Kishino K., Kokubun Y., Suzuki T., Ishii O., Yonezawa S. Fundamentals of optoelectronics: Trans. from Japanese* — M.: Mir, 1988.— O75288 p., ill. With. 89
43. *Potapovich, N.S. Photoelectric converters of narrowband radiation based on InGaAsP/InP heterostructures / N.S. Potapovich, M.V. Nakhimovich, V.P. Khvostikov // Physics and technology of semiconductors*.— 2021.— T. 55, No. 11.— P. 1091–1094.
44. Relationship between the electronic and atomic structure of passivated n-InP(100) surfaces / M.V. Lebedev, T.V. Lvova, A.N. Smirnov [etc.] // *Physics and technology of semiconductors*.— 2022.— T. 56, No. 7.— P. 659–666.
45. *Mordvinova, N.E. Colloidal quantum dots of indium phosphide doped with zinc [Text]: dis. ...cand. chem. Sciences: 02.00.01; protected 03.03.17 / N.E. Mordvinova*.— Moscow, 2017.— 158 p.— Bibliography
46. *Moss, T.S. Semiconductor Opto-Electronics [Text]: educational monograph. manual (corrected)/ T.S. Moss, G.J. Burrell, B. Ellis*.— Oxford, 2013.— 454 p. 47. Agekyan, V.F. *Fundamentals of photonics of semiconductor crystals and nanostructures [Text]: textbook. allowance / V. F. A*
47. *Agekyan, V.F. Fundamentals of photonics of semiconductor crystals and nanostructures [Text]: textbook. benefit / V.F. Agekyan; St. Petersburg State University, Phys. Fak., Dept. solid state physics*.— St. Petersburg: Solo, 2007.— 132 p.
48. *Anselm, A.I. Introduction to the theory of semiconductors [Text]: a textbook for students of higher educational institutions studying in physical and technical areas and specialties / A.I. Anselm*.— Ed. 3rd, erased — St. Petersburg [and others]: Lan, 2008.— 618 p.