

Продольный фотоэффект в $p-n$ -переходах на основе $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$

© С.В. Слободчиков, Х.М. Салихов, Е.В. Руссу

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 22 ноября 1995 г. Принята к печати 27 декабря 1996 г.)

Исследован продольный фотоэффект в $p-n$ -переходах на основе $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$: зависимости продольной фотоэдс V_{phl} от координаты светового пятна, температуры и магнитного поля. Получены линейные зависимости от координаты светового пятна, наблюдается согласие экспериментальных и теоретических значений V_{phl} . Температурный ход V_{phl} в интервале $100 \div 300$ К объяснен изменением подвижности носителей тока, обусловленным тепловым рассеянием на решетке. В магнитном поле наблюдается рост V_{phl} вследствие фотомагнитного эффекта.

На протяжении ряда лет исследованиям фотоэлектрических свойств диодных структур различного вида ($p-n$ -переходы, $p-i-n$ -диоды, гетеропереходы и др.) на основе твердых растворов InGaAs уделялось большое внимание. Этот интерес связан главным образом с созданием высокочувствительных, малоинерционных фотодетекторов в ближней инфракрасной (ИК) области спектра $\lambda = 1.0 \div 1.7$ мкм. Основное, потенциально важное применение их — в системах волоконно-оптической связи. Дальнейшее расширение функциональных возможностей диодных структур на этих твердых растворах дало их экспериментальное исследование в качестве детекторов как ИК излучения, так и газа (водорода) [1,2].

В настоящем сообщении приведены некоторые результаты исследований продольного фотоэффекта в $p-n$ -переходах на основе $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$.

Для создания образцов использовался метод газофазной эпитаксии. На подложке $n^+-\text{InP}$ выращивался n -слой $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ толщиной 2 мкм с концентрацией электронов $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; p -слой формировался за счет легирования Zn , имел толщину 1 мкм и концентрацию дырок $p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Сплошной омический контакт со стороны подложки создавался с помощью сплава $\text{Ag} + \text{Ge} + \text{In}$. Локальные омические контакты на p -стороне выполнялись напылением сплава $\text{Ag} + 10\% \text{ Zn}$ через маски и имели диаметр 1 мкм. Локальное освещение с p -стороны производилось монохроматическим светом от монохроматора SPM-2 с графитовым излучателем через маску с шириной световой полоски 0.4 мм. Измерялась продольная фотоэдс V_{phl} : инверсионная характеристика, температурная зависимость и изменение в магнитном поле.

На рис. 1 приведены инверсионные характеристики фотоэдс диодной структуры (изменение фотоэдс в зависимости от координаты x световой полоски, происходящее со сменой знака) при освещении монохроматическим светом с $\lambda = 1.55$ и 0.67 мкм. Обе ветви характеристик приблизительно линейны, а абсолютная величина продольной фотоэдс V_{phl} при освещении светом с длиной волны вблизи максимума спектральной чувствительности ($\lambda = 1.55$ мкм) примерно на 3 порядка величины больше, чем при коротковолновом облучении. Оценки показывают, что такая разница обусловлена не только

большим различием в плотности падающего потока излучения в обоих случаях, но частично и рекомбинационными потерями на поверхности и в объеме генерированных электронов и дырок. Температурная зависимость продольной фотоэдс при произвольном положении световой полоски в интервале температур $T = 100 \div 300$ К дана на рис. 2. В большей части температурного интервала фотоэдс убывает с ростом температуры, уменьшаясь при $T = 300$ К почти втрое.

Для анализа полученных данных воспользуемся результатами теоретического расчета продольной фотоэдс, выполненными в [3]. Из этой работы следует

$$V_{\text{phl}} = \varphi_p(0) - \varphi_p(l) = \frac{2t\Phi\rho_p \sin h(\alpha l/2) \sin h\alpha(l/2 - x_j)}{w_p\alpha \sin h\alpha l + 2t\alpha \cos h\alpha(l - x_j) \cos h\alpha x_j}, \quad (1)$$

где $2t$ — ширина световой полоски, Φ — плотность потока падающего излучения, $\alpha = \sqrt{g(\rho_p/w_p + \rho_n/w_n)}$,

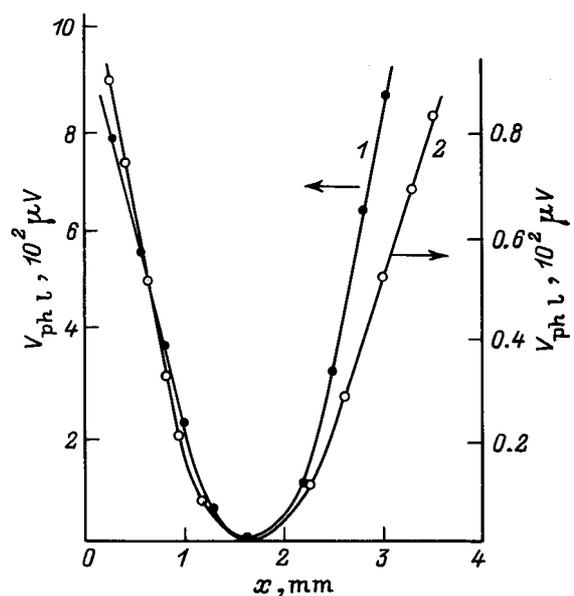


Рис. 1. Инверсионные характеристики продольной фотоэдс в $p-n$ -переходах на основе $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ при освещении светом с $\lambda = 1.55$ (1) и 0.67 (2) мкм.

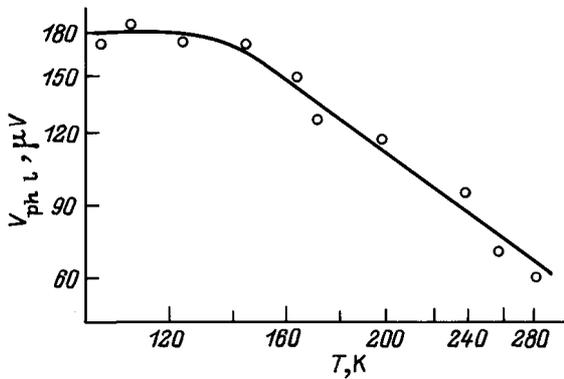


Рис. 2. Температурная зависимость продольной фотоэдс в $p-n$ -структурах на основе $In_{0.53}Ga_{0.47}As$.

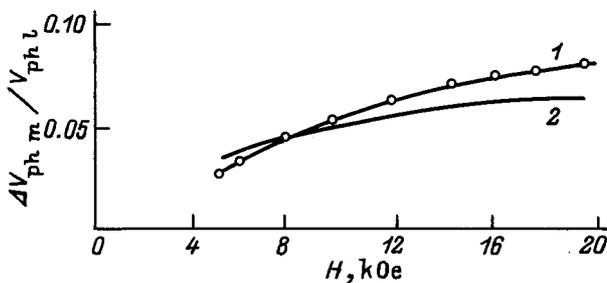


Рис. 3. Изменение продольной фотоэдс $p-n$ -структуры на основе $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ в магнитном поле: 1 — экспериментальная кривая, 2 — расчетная.

$\rho_{p(n)}$ — удельное сопротивление $p(n)$ -слоя, $w_{p(n)}$ — эффективная толщина $p(n)$ -слоя; $g = j_s/nkT$ — проводимость диода, l — длина образца, x — координата световой полосы. Значения V_{ph1} вычислялись по (1) при значениях подвижности электронов $\mu_n \approx 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и дырок $\mu_p \approx 10^2 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $j_s = 6 \cdot 10^{-6} \text{ А}/\text{см}^2$ (из вольт-амперной характеристики), величина $\Phi = 10^{14} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ соответствовала экспериментальной. Линейность инверсионной характеристики (при $2t \ll l$) должна наблюдаться при предельном переходе

$$\lim_{\alpha l \rightarrow 0} V_{ph1}(x) = \frac{2tlq\Phi\rho_p}{w_p} \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{2} \right). \quad (2)$$

В нашем случае $\alpha l = 0.6$ и при этом наблюдается хорошее соответствие вычисленных по (1) и (2) значений V_{ph1} и линейность характеристики. В общем случае, как следует из (1), температурная зависимость V_{ph1} должна определяться температурным ходом тока насыщения j_s и удельного сопротивления ρ_p . Учитывая применимость (2) в наших диодах, следует ожидать изменения V_{ph1} с температурой в основном в соответствии с $\rho_p = f(T)$.

Температурный ход V_{ph1} (рис. 2) может быть представлен как $V_{ph1} \sim T^{-\beta}$, где $\beta = 1.4$. Учитывая относительно большую концентрацию равновесных дырок в p -слое, следует ожидать слабого ее изменения в исследованном

температурном интервале. Тогда температурную зависимость V_{ph1} можно связать полностью с температурным ходом подвижности дырок, $\mu_p \sim T^{-\beta}$, т.е. с их рассеянием на тепловых колебаниях решетки. Наблюдающееся с понижением температуры при $T < 140 \text{ К}$ слабое изменение V_{ph1} , очевидно, определяется возрастающим вкладом рассеяния на ионизированных примесях, при котором, как известно, $\mu_p \sim T^{3/2}$. Продольная фотоэдс возрастает при размещении диодной структуры в магнитном поле H , направленном параллельно освещаемой поверхности p -слоя (рис. 3),

$$V_{ph1}(H) = V_{ph1}(0) + \Delta V_{phm}. \quad (3)$$

При максимальной величине магнитного поля ($H = 20 \text{ кЭ}$) величина ΔV_{phm} составляла $7 \div 8\%$. Приведенная на рис. 3 зависимость $\Delta V_{phm} = f(H)$ напоминает соответствующие кривые зависимости фотомагнитной эдс от магнитного поля в полупроводниковых кристаллах p - или n -типа проводимости [4]. Зависимость, аналитически выражаемая соотношением

$$V_{phm} = A \frac{H/c}{\sqrt{1 + (\mu_n H/c)^2}}, \quad (4)$$

соответствует полученной нами экспериментальной кривой $\Delta V_{phm} = f(H)$ (рис. 3, кривая 2). Формула (4) справедлива при малой скорости поверхностной рекомбинации. Относительно небольшой прирост ΔV_{phm} , наблюдавшийся экспериментально, в значительной степени связан с тем, что глубина генерации неравновесных носителей тока при $\lambda = 1.55 \text{ мкм}$ сравнима с толщиной p -слоя и градиент диффузионного тока оказывается небольшим. Очевидно, что диодная структура может быть технологически оптимизирована с целью получения максимальных абсолютных величин продольной фотоэдс, в том числе и с помощью магнитного поля, и будет представлять практический интерес как продольный фотоэлемент.

Список литературы

- [1] С.В. Слободчиков, Г.Г. Ковалевская, М.М. Мередов, А.В. Пенцов, Е.В. Руссу, Х.М. Салихов. Письма ЖТФ, **17**, вып. 5, 1 (1991).
- [2] С.В. Слободчиков, Е.В. Руссу, Х.М. Салихов, М.М. Мередов, А.И. Язлыева. Письма ЖТФ, **21**, вып. 19, 50 (1995).
- [3] U. Nin, T. Matsuda, H. Sadamatzu, M. Takai. Japan. J. Appl. Phys., **15**, 601 (1976).
- [4] Ю.В. Равич. Фотомагнитный эффект в полупроводниках и его применение (М., Сов. радио, 1967) гл. 1, § 3.

Редактор Л.В. Шаронова

The lateral photoeffect in $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ $p-n$ junctions

S.V. Slobodchikov, Kh.M. Salikhov, E.V. Russu
A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia