

InGaAs фотокатод как источник электронов

А.А. Егоренков^{1,2}, В.И. Зубков¹, В.Е. Шипков^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

²АО «ЦНИИ «Электрон»

Аннотация: в данной работе исследовались фотоэлектрические свойства фотокатода на основе гетероструктуры InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As в качестве источника электронов. Измерены спектральные характеристики фотокатода, зависимость темнового тока и тока внешней фотоэмиссии при различных режимах подсветки. По результатам анализа полученных данных предложены новые возможные применения такого фотокатода.

Ключевые слова: фотокатод, In_{0.53}Ga_{0.47}As, коротковолновый ИК-диапазон, источник электронов

1. Введение

Полупроводниковые фотокатоды на основе твердого раствора In_{0.53}Ga_{0.47}As известны достаточно давно. В литературе [1,2,3] они описываются как фотокатоды с чувствительностью в коротковолновом ИК диапазоне с квантовым выходом $QE \leq 5\%$.

В данной работе проводились исследования гетероструктур InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As, активированных в вакууме нанометровым слоем Cs/O. Приведены измеренные спектральные характеристики фотокатода при работе в режиме «на просвет», измерен темновой ток и световой отклик при статической и импульсной засветке. По результатам анализа полученных данных предложены новые применения такого фотокатода в СВЧ области, а также в качестве источника электронов при проведении измерений фотоэлектрических параметров чувствительных элементов, предназначенных для регистрации потока электронов.

2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Исследуемый фотокатод представляет собой двойную гетероструктуру *p*-InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/*p*-InP с металлическим контактом Шоттки, нанесенным на эмиттерный слой, Таблица 1. Фотокатод при внешней засветке работает в режиме «на просвет».

Таблица 1. Параметры слоев фотокатода.

Слой	Концентрация примеси, см ⁻³	Толщина, мкм
<i>p</i> -InP (подложка)	2×10^{17}	300±25
<i>p</i> -InP (буфер)	5×10^{16}	1.5
In _{0.53} Ga _{0.47} As (активный)	4×10^{16}	2.5
<i>p</i> -InP (эмиттерный)	2×10^{16}	0.15

Перед загрузкой в вакуумную камеру, оснащенную источниками кислорода и цезия, а также нагревательным элементом и анодом для измерения тока эмиссии, фотокатод подвергался стандартной обработке в растворах серной и азотной кислот [4,5]. После загрузки и достижения вакуума в камере 1×10^{-7} Па фотокатод подвергался термическому прогреву при температуре 300 °С в течение 30 минут, после чего с помощью источников цезия и кислорода стандартным методом [6,7] проводилась его активировка (понижение работы выхода) с целью достижения максимального тока внешней фотоэмиссии.

Для подачи высокого напряжения U_A между фотокатодом и анодом использовался

источник питания Б5-60М, для подачи напряжения смещения U_{CM} на управляющий электрод фотокатода – DC-DC конвертер DPS 3003. Постоянная оптическая засветка осуществлялась с помощью монохроматора ДМР-4, а импульсная – с помощью светодиода Thorlabs ML925B45F ($\lambda = 1.55$ мкм, $P = 5$ мВт) с драйвером. Измерение статического тока с анода производилось амперметром Ц300, а импульсных характеристик – с помощью осциллографа Tektronix RDS 2024С.

Измеренная спектральная характеристика квантового выхода (рисунок 1) является типичной для такого типа фотокатодов и соответствует измерениям, описанным в литературе. Спад характеристики вблизи 0.95 мкм связан с «работой на просвет», эта длина волны является красной границей фотоэффекта для подложки фосфида индия.

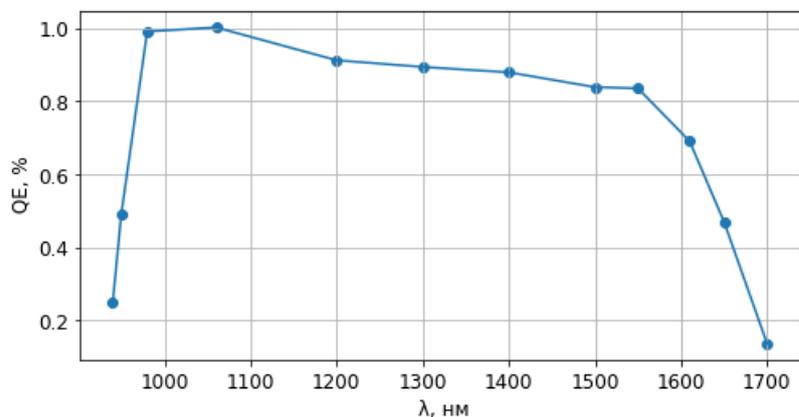


Рисунок 1. Спектральная характеристика фотокатода ($U_{CM} = 2.1$ В).

Также были экспериментально получены зависимости темнового тока и тока при постоянной засветке в зависимости от напряжения смещения (рисунок 2).

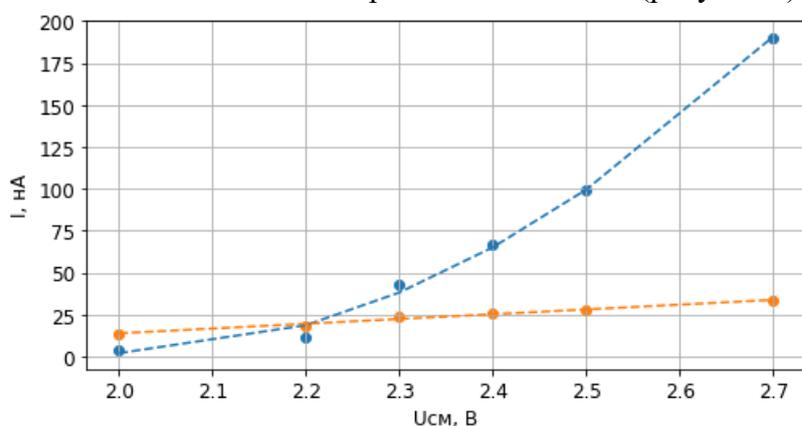


Рисунок 2. Зависимость темнового (синия) и полезного светового (оранжевая) тока от напряжения смещения при мощности светового потока $P = 1.56 \times 10^{-6}$ Вт.

Далее были выполнены исследования характерных для структуры времен релаксации к исходному состоянию путем измерения зависимости барьерной емкости фотокатода от напряжения. На тыльной стороне фотокатода был нанесен контакт Шоттки, на лицевой стороне – омический. На контакт Шоттки подавалось обратное смещение, что соответствует нормальному режиму работы фотокатода, когда на омический контакт приходится положительное напряжение относительно подложки, за счет которого осуществляется вытягивание электронов к поверхности эмиттера. Вольт-фарадная $C(V)$ характеристика образца представлена на рисунке 3.

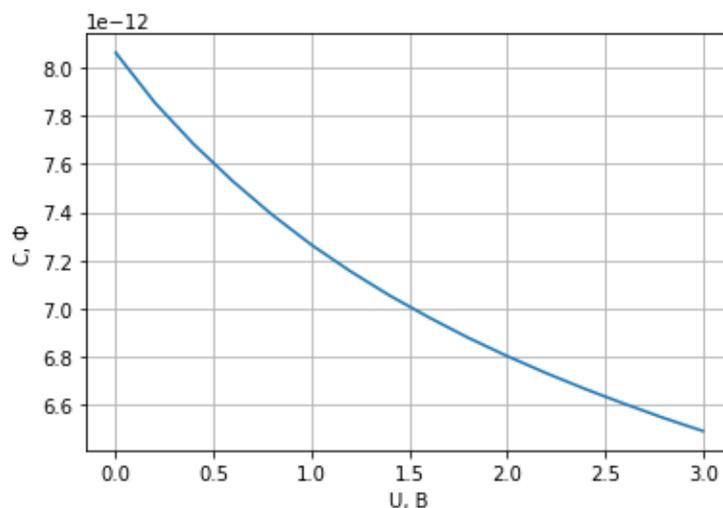


Рисунок 3. Вольт-фарадная характеристика фотокатода в нормальном режиме включения.

Вычисление критической частоты возможно с использованием экспериментально измеренной емкости фотокатода, в зависимости от приложенного напряжения. С учетом сопротивления выходного узла 100 Ом можем получить значение для критической частоты работы фотокатода:

$$\tau_{\text{зат}} = RC, \quad (1)$$

$$f_{\text{крит}} = \frac{1}{\tau_{\text{зат}}}, \quad (2)$$

$$f_{\text{крит}} = \frac{1}{RC}, \quad (3)$$

где $\tau_{\text{зат}}$ – время затухания импульса.

На рисунке 4 представлена рассчитанная зависимость критической частоты (3) от напряжения.

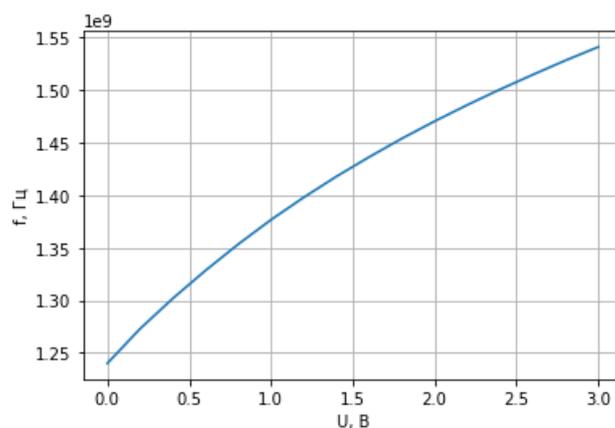


Рисунок 4. Зависимость критической частоты работы фотокатода от напряжения.

Исследование времени нарастания переднего фронта и спада заднего фронта сигнала с фотокатода производилось с помощью осциллографа. В качестве анода была использована кремниевая пластина с нанесенным контактом площадью 13×10 мм. На рисунке 5 изображены осциллограммы, снятые при $U_{\text{CM}} = 3.5$ В. Амплитуда сигнала фототока на осциллограмме $U_{\phi}(3.5 \text{ В}) = 3$ мВ. Величина фототока в импульсе

$I_{\phi} = 30 \text{ мкА} = 3 \text{ мВ}/100 \text{ Ом}$ (импульс жёлтого цвета в центре нижней кривой). Верхний, зеленый импульс, отображает световой импульс (это сигнал фотодиода, который находится внутри светодиода). Питание драйвера светодиода осуществлялось генератором импульсов Г5-75, нагруженным на резистор 50 Ом. Напряжение питания светодиода $U_{num} = 2 \text{ В}$. Длительность светового импульса $\tau = 100 \text{ нс}$.

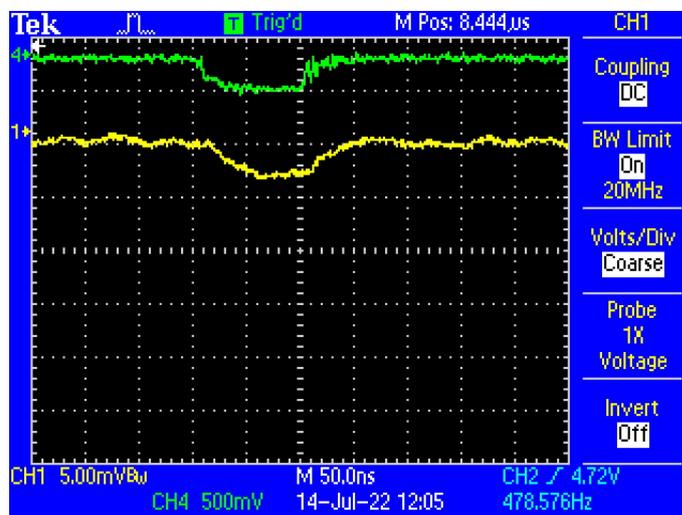


Рисунок 5. Осциллограмма переднего и заднего фронта сигнала с фотокатода. Фотоэмиссионный импульс жёлтого цвета; световой импульс от фотодиода, находящегося внутри светодиода, – зеленый.

Используя время затухания заднего фронта сигнала, равное 50 нс, можно оценить критическую частоту работы фотокатода при световом воздействии, аналогично формуле (2):

$$f_{\text{крит}} = \frac{1}{\tau_{\text{зат}}} = \frac{1}{50 \text{ нс}} = 20 \text{ МГц.} \quad (4)$$

3. Заключение

Проведенные исследования гетероструктурного $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ фотокатода показали новые потенциальные возможности его применения.

Из-за наличия темнового тока, управляемого приложенным смещением, такой фотокатод можно применять в качестве источника электронов малой плотности с высокой равномерностью по всей эмитирующей поверхности. Такой «холодный» источник электронов имеет большую площадь ($\geq 1 \text{ см}^2$) и может стать альтернативой существующим автоэмиссионным катодам. Конкретно, он может найти применение в случаях, когда во время эксперимента необходимо ограничить тепловое и световое излучение, например, при измерении приборов, оптимизированных под регистрацию потока электронов, но подверженных возникновению в эксперименте паразитных сигналов. Такой способ уже применяется нами для исследования чувствительности и ее равномерности по поверхности кремниевых электронно-чувствительных ППЗ матриц, производимых в АО «ЦНИИ «Электрон» [8].

При использовании импульсного режима освещения возможно использование фотокатода в СВЧ-применениях. Как показано в нашей работе, при подаче короткого импульса света происходит быстрое (десятки нс) нарастание и спад фототока, что позволяет фотокатоду за короткий промежуток времени вернуться в исходное невозбужденное состояние. Проведенные эксперименты показали возможность применения такой гетероструктуры в качестве источника электронов с критической

частотой как минимум 20 МГц. Предположительно, этот параметр можно еще повысить, уменьшив площадь фотокатода.

Список литературы

1. Escher J. S. et al. Photoelectric imaging in the 0.9-1.6 micron range //IEEE Electron Device Letters. – 1981. – Т. 2. – № 5. – С. 123-125.
2. Transferred electron photocathode with greater than 5% quantum efficiency beyond 1 micron / K. A. Costello, G. A. Davis, R. E. Weiss [et al.] //Proc. SPIE 1449, Electron Image Tubes and Image Intensifiers II – 1991. doi: 10.1117/12.44264.
3. Айнбунд М.Р., Миронов Д.Е., Зубков В.И. Гибридные фотоэлектронные приборы // Успехи прикладной физики. – 2018. – Т. 6. – № 5. – С. 401–407.
4. Tereshchenko O.E. Preparation of clean reconstructed InP(001) using HCl/isopropanol wet treatments / O.E. Tereshchenko, D. Paget, P. Chiaradia, J.E. Bonnet, F. Wiame, A. Taleb-Ibrahimi // Surf. Sci. – 2006. – Vol. 600. – p. 3160– 3166.
5. Tereshchenko O. E., Chikichev S. I., Terekhov A. S. Composition and structure of HCl-isopropanol treated and vacuum annealed GaAs (100) surfaces // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 1999. – Т. 17. – № 5. – С. 2655-2662.
6. Rodway D. C., Allenson M. B. In situ surface study of the activating layer on GaAs (Cs, O) photocathodes // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1986. – Т. 19. – № 7. – С. 1353.
7. Bakin V. V. et al. p-GaAs (Cs, O)-photocathodes: Demarcation of domains of validity for practical models of the activation layer //Applied Physics Letters. – 2015. – Т. 106. – № 18. – С. 183501.
8. Безызлучательный способ получения потока электронов в вакууме [Текст]: пат. 2792181 Рос. Федерация: С 05/22.