

InP/InGaAs фотокатод для гибридных фотоприемников ближнего ИК диапазона

К.Я. Смирнов^{1,2}, В.В. Давыдов³, Ю.В. Батов³

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, пр. Большевиков 22/1, Санкт-Петербург, Россия 193232

²АО «Центральный научно-исследовательский институт «Электрон», пр. Горького 68Р, Санкт-Петербург, Россия, 194223

³Высшая школа космических технологий и телекоммуникаций, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

Аннотация. В статье описана технология создания фотокатода с тянущим полем на основе гетероструктур InP/InGaAs с квантовой эффективностью на уровне 5% в спектральном диапазоне 0,9-1,7 мкм. Рассмотрен эффект снижения квантовой эффективности фотокатодной структуры при повышении облученности образца. Предложены различные варианты реализации гибридных вакуумных приборов на основе InP/InGaAs фотокатода для специальных задач.

1. Введение

В настоящее время всё более широкое применение находят различные фотодетекторы, работающие в спектральном диапазоне 0,9-1,7 мкм (SWIR). Активно развивается направление инфракрасных видеокамер на основе InGaAs матриц. Однако, характеристики чувствительности и пороговой облученности таких камер являются недостаточными для ряда специальных задач, связанных с регистрацией отраженного ИК-излучения в условиях плохой видимости, ряда методов неразрушающего контроля, рефрактометрии, локации [1-4]. Вакуумные фотоэлектронные приборы с фотокатодами позволяют обеспечить значительно более высокие показатели чувствительности за счет внутреннего усиления. В случае ИК спектрального диапазона в качестве фотокатода, реализованного по принципу междолинного переноса электронов (ФКМПЭ), используется гетероструктура InP/InGaAs[5-6].

2. Формирование и характеристики InP/InGaAs фотокатода

Фотокатод представляет собой гетеропару фосфид индия – индий галлий арсенид, выращенную методом химического осаждения из газовой фазы металлоорганических соединений (MOCVD) на подложке InP 350 мкм. Для формирования на поверхности структуры барьера Шоттки, необходимого для создания ФКМПЭ, осуществлялось напыление Ti. Титановый электрод представлял собой сетку толщиной 300 ангстрем. Для создания эффективного фотокатода, на атомарно чистую поверхность InP/InGaAs гетероструктуры с Ti электродом осаждались молекулы Cs и O₂ в сверхвысоком вакууме [7-10].

В результате процесса активировки фотокатодной структуры были получены результаты квантовой эффективности на уровне нескольких процентов (Рис. 1) [5]. В частности, на длине волны 1500 нм. была получена квантовая эффективность на уровне более 5%.

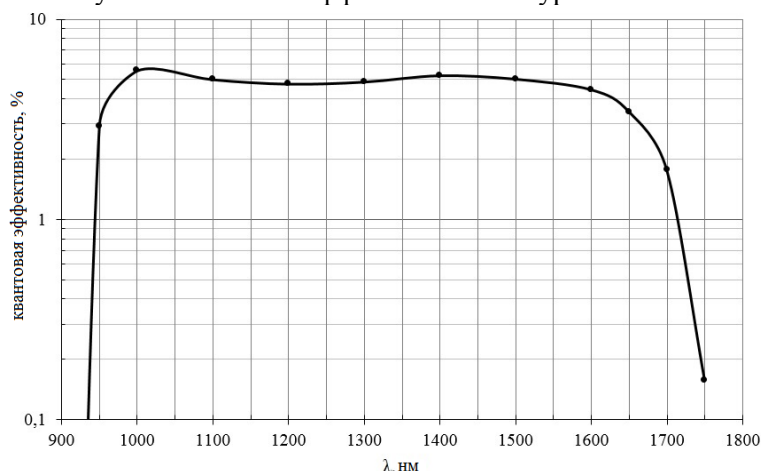


Рисунок 1. Спектральные характеристики InP/InGaAs гетероструктур при напряжении смещения $U_c = 3$ В.

Кривая на рисунке 1 получена с помощью монохроматора. На длине волны 1500 нм, его мощность составляла $1,56 \times 10^{-6}$ Вт. Был обнаружен эффект снижения спектральной чувствительности фотокатодной структуры при увеличении мощности падающего на него излучения. На рисунке 2 представлен график зависимости квантовой эффективности исследованного InP/InGaAs фотокатода от степени его облученности при различном напряжении смещения, поданном на Ti электрод.

Этот эффект может быть объяснён накоплением электронов в приповерхностном слое InP-эмиттера фотокатодной гетероструктуры [11-12]. В среднем, возможность выхода электрона из эмиттерного слоя в вакуум может быть оценена не более чем в 10%. Электроны, не испускаемые и, следовательно, оставшиеся в электронно-излучающем слое, оседают в приповерхностной области между эмиттером и металлическим контактом и разряжаются. Это приводит к подавлению эмиссионных свойств и вследствие этого чувствительности к излучению. Возможным решением этой проблемы может служить изменение физических характеристик InP-эмиттера, увеличение активной эмиссионной области фотокатода относительно площади сетчатого электрода [11], применение системы ослабления сигнала в фотоприемных модулях с InP/InGaAs сенсором.

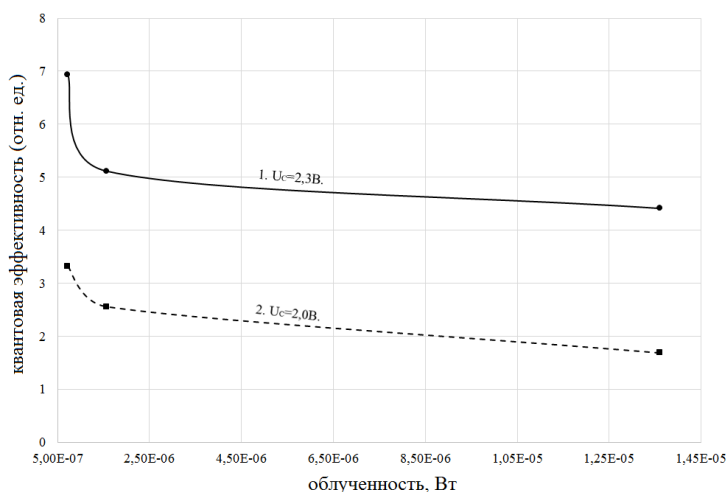


Рисунок 2. Зависимости квантовой эффективности InP/InGaAs фотокатода от степени его облученности при напряжении смещения: 1 – $U_c = 2,3$ В; 2 – $U_c = 2,0$ В.

3. Конструкция гибридного прибора с InP/InGaAs фотокатодом

Полученные гетероструктуры могут быть использованы в гибридных фотоприемных устройствах, содержащих в одном вакуумном объеме фотокатод и электронночувствительный элемент [13]. Такая технология позволяет получить большую чувствительность благодаря внутреннему усилению прибора, которое достигается путем приложения больших напряжений на участок катод–анод (детектор фотоэлектронов), что позволяет передать электронам энергию в несколько килоэлектрон-вольт. “Разогнанные” фотоэлектроны далее тормозятся в слое твердотельного детектора фотоэлектронов, порождая электронно-дырочные пары, что позволяет получить внутреннее усиление в приборе до 10^3 раз. Используя данную технологию возможно создать различные устройства специального назначения [13-16]. Конструкция прибора представлена на рис. 3. Она является унифицированной, в зависимости от выбора типа преобразователя электронов меняется лишь тип контактной платы и сам фотоэлемент. На данный момент ведется работа по 3 различным направлениям:

Приборы на основе массивов рpn-диодов, где в качестве преобразователя фотоэлектронов могут быть использованы линейки и матрицы рpn-диодов, выполненные из кремния и бомбардируемые электронами с задней стороны (“back-illuminated”). Применение диодной технологии позволят добиться регистрации ИК излучения с временным разрешением менее 10нс, при темновых токах на элементах диодного массива менее 100 нА. Преимущества данного типа фотодетекторов целесообразно использовать в бортовых системах сканирования быстро движущихся объектов. Это позволит избежать ряда недостатков присущих существующим системам сканирования, таких как низкую частоту строчной развертки, высокие массогабаритные параметры и недостаточный уровень надежности.

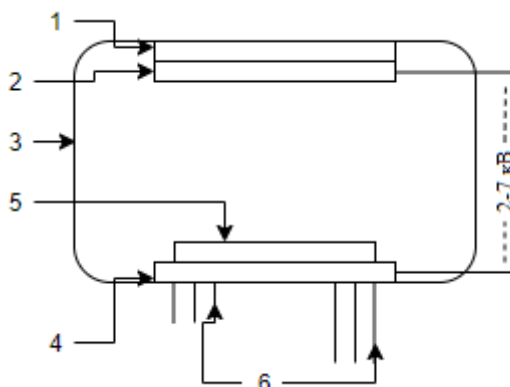


Рисунок 3. Конструкция прибора: 1 – входное окно, 2 — узел InP/InGaAs фотокатода, 3 – корпус прибора, 4– плата держателя преобразователя электронов, 5 – преобразователь электронов, 6 – вводы и выводы прибора.

На основе InP/InGaAs фотокатода могут быть созданы приборы сверхвысокой чувствительности, использующие в качестве преобразователя электронов рpn-диод с лавинной технологией усиления (SPD APD). Применение лавинного умножения эффективных носителей в структуре диода позволяет добиться дополнительного усиления 10^2 раз на выходе сенсора, что позволяет рассчитывать на спектральную чувствительность в несколько сотен А/Вт на длине волны 1500 нм.

Использование гибридной технологии для конструирования ИК камер позволяет значительно повысить их чувствительность в сравнении с твердотельными детекторами, выполненными из InGaAs. Здесь в качестве детектора фотоэлектронов выступает электронно-чувствительная ППЗ-матрицы (Electron Bombardment Back Side CCD), бомбардируемая с задней стороны. Матрица выполнена из кремния и имеет собственную спектральную чувствительность в видимом диапазоне, однако, фильтрация излучения в видимом спектре происходит автоматически из-за оптических свойств InP/InGaAs/InP гетероструктуры. Подложка InP имеет крайне низкий уровень оптического пропускания фотонов с энергией, соответствующей

спектральному диапазону до 900 нм. Создание таких приборов является наиболее сложным из-за требований не только к чувствительности фотокатода и отсутствию дефектов ПЗС-матрицы, но и равномерности фотокатодной структуры, а также к низким значениям темнового эмиссионного тока на см².

4. Заключение

Таким образом, разработка InP/InGaAs фотокатода с высокими параметрами квантовой эффективности, равномерности и низким уровнем темнового тока открывает большие возможности для создания линейки приборов специального назначения для детектирования сигналов спектрального диапазона 0,9-1,7 мкм. Использование гибридной технологии формирования прибора, обеспечивающей внутреннее усиление в приборе 10^3 раз, позволяет рассчитывать на значительно лучшие показатели обнаружительной способности, чем существующие приборы аналогичного назначения.

5. Литература

- [1] Grebenikova, N.M. The universal optical method for condition control of flowing medium / N.M. Grebenikova, K.J. Smirnov, V.V. Artemiev, V.V. Davydov, S.V. Kruzhalov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1038(1). – P. 012089.
- [2] Vologdin, V.A. On specific features of investigation of fluid flows by photometric techniques / V.A. Vologdin, V.V. Davydov, E.N. Velichko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 741(1). – P. 012095.
- [3] Nepomnyashchaya, E.K. Investigation of ferrofluid nanostructure by laser light scattering: Medical applications / E.K. Nepomnyashchaya, E.N. Velichko, I.V. Pleshakov, E.T. Aksenov, E.A. Savchenko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 841(1). – P. 012020.
- [4] Moiseev, E.I. High-temperature lasing in diode microdisk lasers with InAs/InGaAs quantum dots / E.I. Moiseev, N.V. Kryzhanovskaya, Yu.S. Polubavkina, M.V. Maximov, M.M. Kulagina, S.I. Troshkov, Yu.M. Zadiranov, A.A. Lipovskii, I.S. Mukhin, M. Guina, T. Niemi, A.E. Zhukov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 769. – P. 012056.
- [5] Smirnov, K.J. Photocathodes for near infrared range devices based on InP/InGaAs heterostructures / K.J. Smirnov, V.V. Davydov, S.F. Glagolev, N.S. Rodygina, N.V. Ivanova // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1038. – P. 012102.
- [6] Aebi, V.W. Multichannel intensified photodiode for near infrared single photon detection / V.W. Aebi, D.F. Sykora, M.J. Jurkovic, K.A. Costello // *Proceedings of SPIE*. – 2011. – Vol. 8033.
- [7] Myazin, N.S. Spectral characteristics of InP photocathode with a surface grid electrode / N.S. Myazin, K.J. Smirnov, V.V. Davydov, S.E. Logunov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 929. – P. 012080.
- [8] Smirnov, K.J. High sensitive InP emitter for InP/InGaAs heterostructures / K.J. Smirnov, V.I. Medzakovskiy, V.V. Davydov, M.G. Vysoczky, S.F. Glagolev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 917(6). – P. 062019.
- [9] Sun, Y. Optimized cleaning method for producing device quality InP(100) surface / Y. Sun, Z. Liu, F. Machuca, P. Pianetta, W. Spicer // *SLAC-PUB*. – 2007. – Vol. 97. – P. 124902-124909.
- [10] Chanlek, N. The degradation of quantum efficiency in negative electron affinity GaAs photocathodes under gas exposure / N. Chanlek, J. Herbert, R. Jones, L. Jones, K. Middleman, B. Milityn // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2014. – Vol. 47. – P. 055110.
- [11] Niigaki, M. Field-assisted photoemission from InP/InGaAsP photocathode with p/n junction / M. Niigaki, T. Hirohata, T. Suzuki, H. Kan, T. Hiruma // *Appl. Phys. Lett.* – 1997. – Vol. 71. – P. 2493.
- [12] Junkai, X. Numerical simulation study on quantum efficiency characteristics of InP/InGaAs/InP infrared photocathode / X. Junkai, X. Xiangyan, T. Jinshou, L. Duan, H. Dandan // *Infrared Technology and Applications, and Robot Sensing and Advanced Control Proceedings*. – 2016. – Vol. 10157. – P. 101573.
- [13] Mingzhu, Y. Spectral response of InGaAs photocathodes with different emission layers / Y. Mingzhu, J. Muchun, C. Benkang // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55(31). – P. 8732-8737.

- [14] Dussault, D. Noise performance comparison of ICCD with CCD and EMCCD cameras / D. Dussault, P. Hoess // SPIE. – 2006. – Vol. 5563. – P. 195-204.
- [15] Goodson, J. Developments in S-1 Photocathode Image Converters for High Speed Streak /Framing/ Photography / J. Goodson, B. Garfield // Advances in Electronics and Electron Physics. – 1985. – Vol. 64. – P. 87-92.
- [16] Hadfield, R. Single-photon detectors for optical quantum information applications // Nature Photonics. – 2009. – Vol. 3. – P. 696-705.

InP/InGaAs photocathode for hybrid SWIR photodetectors

K.J. Smirnov^{1,2}, V.V. Davydov³, Y.V. Batov³

¹Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Bolshhevikov avenue 22/1, Saint Petersburg, Russia, 193232

²OJSC “NRI “Electron”, Torez avenue 68R, Saint Petersburg, Russia, 194223

³Higher School of applied physics and space technologies, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Polytechnic street 29, Saint Petersburg, Russia, 195251

Abstract. The technology of creation the photocathode with quantum efficiency at the level of 5% based on the InP/InGaAs heterostructures is given. The effect of decreasing the quantum efficiency of the photosensitive structure on radiant sensitivity is considered. Several variants of realization of vacuum photoelectronic device with InP/InGaAs photocathode for special purposes are represented.