

- 44 с.
2. *Cooke B. J., Laubsher B. E., Borel C. C. et al.* Methodology for rapid infrared multi-spectral electro-optical imaging system performance analysis and synthesis// SPIE Proc. 1996. V. 2743. P. 52—86.
3. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения: Пер. с англ./ Под ред. А. И. Горячева — М.: Мир, 1978. — 416 с.
4. *Heikell J.* Electronic warfare self-protection of battlefield helicopters: a holistic view. — Finland, Helsinki University of

Technology, Applied electronics laboratory, Series E: Electronics Publications E18.

5. *Schwartz C. R., Eismann M. T., Cederquist J. N. et al.* Thermal multispectral detection of military vehicles in vegetated and desert backgrounds// SPIE Proc. 1996. V. 2742. P. 286—297.

6. *Куликов В. Б., Залевский И. Д., Бородин Д. В. и др.* Инфракрасные фотоприемники на основе структур с квантовыми ямами// Электронная промышленность, 2003. № 2. С. 143—150.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

Estimation for effectiveness of use of mono- and two-spectral focal plane arrays based on quantum well structures

A. A. Solodkov

The 22-nd Central Research Institute, Mytichshi, Moscow Region, Russia

V. B. Kulikov

Polyus Research Institute, Moscow, Russia

Account is taken of methods and results of calculation estimation for effectiveness of use of focal plane arrays based on multilayer structures with quantum wells, which are built up in to an instrumentation module.

УДК 621.315.592

Формирование фотодиодов на основе n -HgCdTe имплантацией As^+

В. В. Васильев, В. С. Варавин, Т. И. Захарьяш, Д. Ю. Протасов, Р. Н. Смирнов, Д. Г. Икусов

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

Имплантацией мышьяка в слои HgCdTe n -типа, выращенные методом МЛЭ на подложках из GaAs, изготовлены p^+ - n -переходы. Профили распределения мышьяка после легирования были измерены с помощью вторичной ионной масс-спектропии (ВИМС). Для электрической активации атомов мышьяка применялся двухстадийный отжиг. Тестовые фотодиоды были изготовлены по меза-технологии. Плотность темного тока для полученных фотодиодов при смещении $U = -0,1$ В составляет $\sim 0,04$ А/см². Значение произведения $R_0 \cdot A$ лежит в диапазоне 20—28 Ом·см² ($\lambda_s = 9,7$ мкм). Оценка интегральной амперваттной чувствительности дает значение $S = 1,92$ А/Вт.

Фотоприемные устройства (ФПУ) на основе тройного раствора $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (КРТ) широко применяются для регистрации ИК-излучения, превосходя своих конкурентов по большинству параметров. В качестве фотоприемных элементов в матричных ФПУ больших форматов используются фотодиоды, так как они в отличие от фоторезисто-

ров обладают низкой мощностью рассеивания и могут быть легко мультиплексированы на фокальной плоскости [1].

В настоящее время для создания фотодиодов наиболее широко применяются образцы КРТ с p -типом проводимости. Это связано прежде всего с легкостью формирования областей с n -типом

проводимости в материале p -типа. Однако диоды p^+-n имеют ряд преимуществ по сравнению с диодами n^+-p . Концентрация основных носителей заряда в слоях n -типа легко контролируется с помощью внешнего легирования в диапазоне 10^{14} — 10^{15} см^{-3} [2], что позволяет достигать больших значений $R_0 \cdot A$ в длинноволновом диапазоне [1]. Кроме того, время жизни в n -типе при низких температурах не ограничено в отличие от p -типа нефундаментальным механизмом рекомбинации Шокли-Рида [3].

Еще одной целью, достигаемой при использовании базового слоя n -типа, является уменьшение последовательного сопротивления для фототока в ФПУ больших форматов. Как известно, из-за падения напряжения при протекании большого суммарного фототока фотодиодов по высокоомной базе p -типа происходит выключение диодов центральной области матричных ФПУ (эффект "бульки") [4]. Кроме того, высокое последовательное сопротивление вместе с емкостью перехода ограничивает предельную частоту работы фотоприемника.

В данной работе демонстрируется технология создания p - n -переходов в слоях КРТ n -типа.

Технология изготовления

Фотодиоды изготавливались на гетероэпитаксиальных слоях КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs [5]. Сразу после выращивания пленки имели n -тип проводимости, который контролировался с помощью измерения эффекта Холла.

Наиболее распространенный способ создания p - n -перехода в материале КРТ n -типа проводимости — использование процесса диффузии мышьяка из очень мелкого, ограниченного источника диффузии, созданного ионной имплантацией мышьяка [6, 7]. Ионная имплантация As с энергиями около 100 кэВ создает очень мелкий, ограниченный источник диффузии мышьяка глубиной менее 1 мкм. На этой стадии мышьяк электрически неактивен. Холловские измерения при этом указывают на присутствие n^+ -слоя из-за радиационно-стимулированных дефектов, свойственных процессу ионной имплантации.

Активация, при которой мышьяк приобретает акцепторные свойства, достигается термическим отжигом образцов. Для этого была использована двухстадийная схема отжига. Отжиг имплантированных мышьяком образцов проводился в вертикальном реакторе с двумя зонами нагрева. На дно реактора наливали слой ртути, давление ее паров

задавалось ее температурой, которая поддерживалась нижним нагревателем. На подставке высотой 25 см устанавливали образец и поддерживали его температуру верхним нагревателем. Высокотемпературная стадия отжига проводилась при температуре образца 350—360 °С и температуре ртути 340—350 °С в течение 2 ч. На этой стадии происходит активация мышьяка, и одновременно в объеме образца генерируются вакансии ртути. Для заполнения последних проводилась вторая низкотемпературная стадия отжига при температуре образца 215—225 °С и температуре ртути 205—215 °С. Температура ртути поддерживалась на 10 °С ниже температуры образца для избежания конденсации капель ртути на его поверхности, при этом давление паров ртути было близко к насыщенному.

После ионной имплантации мышьяка холловские измерения показывали увеличение концентрации электронов (интегрально по всему образцу) до величины $(0,6—1) \cdot 10^{16}$ см^{-3} , что свидетельствовало об образовании приповерхностного n^+ -слоя с радиационными дефектами. Это подтверждается тем, что стравливание на спутнике образца тонкого слоя толщиной около 1 мкм приводит к восстановлению концентрации до исходного значения.

После двухстадийного активационного отжига холловские измерения показали, что образец в объеме имеет n -тип проводимости с концентрацией около $1 \cdot 10^{14}$ см^{-3} . Профили распределения мышьяка в КРТ n -типа до и после активационного отжига, полученные методом ВИМС, представлены на рис. 1. Фотодиоды изготавливались по мезотехнологии (рис. 2).

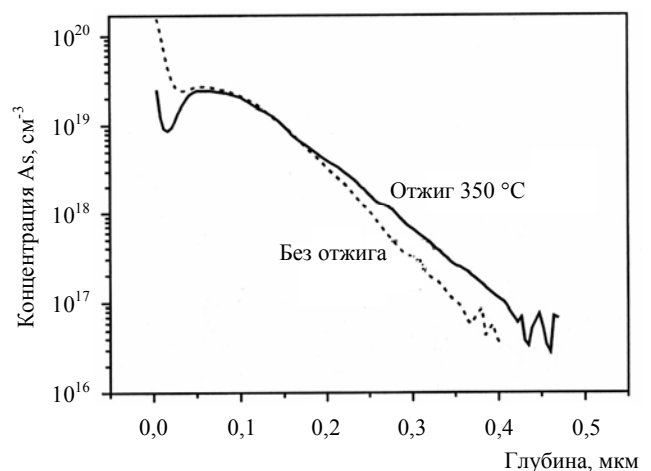


Рис. 1. Профили распределения мышьяка в КРТ n -типа до и после активационного отжига, полученные методом ВИМС

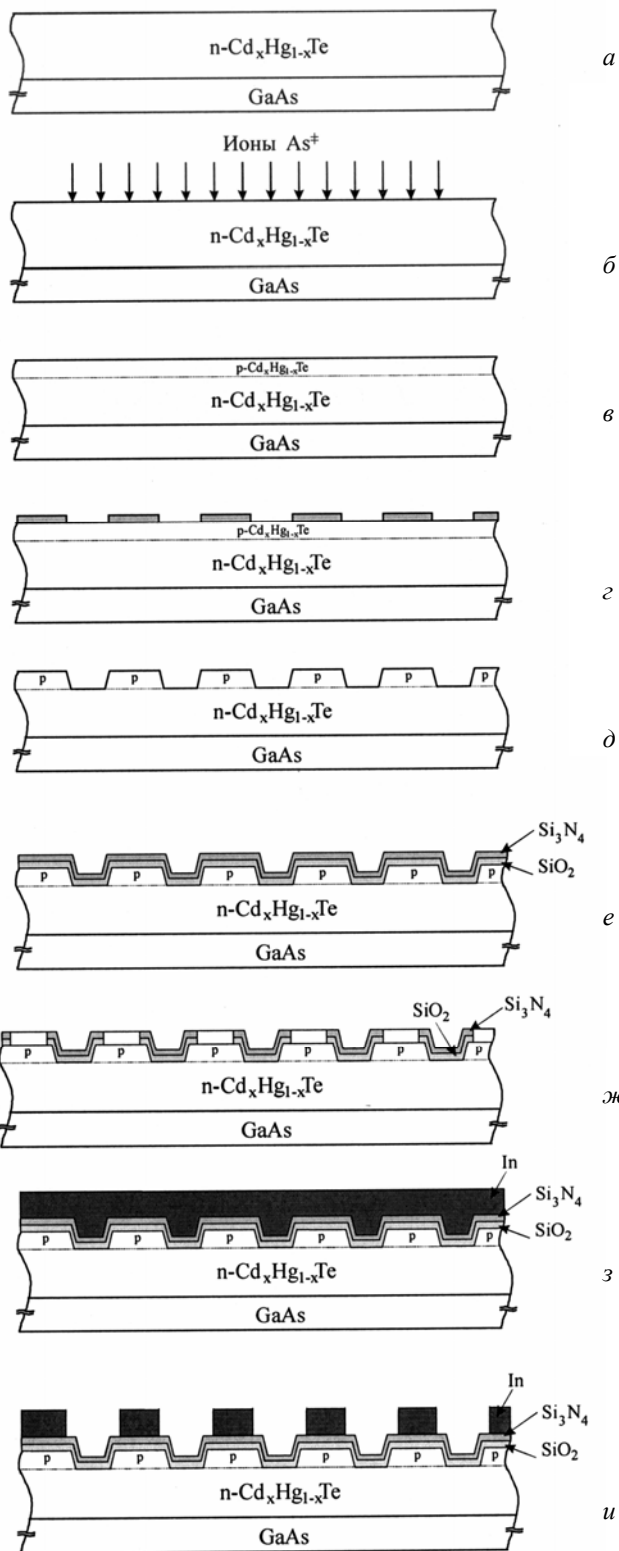


Рис. 2. Стадии формирования меза-диодов:
а — химическая очистка подложки; *б* — имплантация ионов мышьяка; *в* — активационный отжиг и формирование *p-n*-перехода; *г* — нанесение фоторезиста и проявление рисунка; *д* — травление меза-структур; *е* — низкотемпературное плазмохимическое осаждение двуокиси кремния и нитрида кремния; *ж* — вскрытие контактных окон в диэлектрике; *з* — напыление индия; *и* — фотолитография по индию

Параметры фотодиодов

На рис. 3 приведены вольт-амперные характеристики и дифференциальное сопротивление для тестовых диодов, измеренные при температуре 77 К.

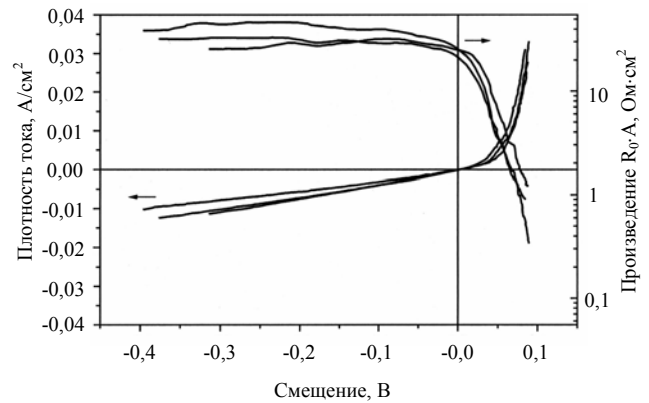


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики и дифференциальное сопротивление для тестовых фотодиодов. Температура 77 К, $\lambda_s = 9,7$ мкм, $A_d = 4,9 \cdot 10^{-3}$ см²

Плотность темнового тока при смещении $U = -0,1$ В составляет $\sim 0,04$ А/см². Линейное изменение обратного тока при увеличении смещения можно объяснить утечками по поверхностям меза-структуры. Значение произведения $R_0 \cdot A$ для данных фотодиодов лежит в диапазоне 20—28 Ом·см². Это значение попадает в интервал лучших достижений для *p-n*-переходов с длинноволновой границей чувствительности 9,7 мкм [1].

Плотность фототока при засветке фоном в апертуре $2\theta = 18,5^\circ$ равна $(3—5) \cdot 10^{-4}$ А/см². Небольшое значение фотоотклика вызвано тем, что при засветке с планарной стороны меза-диодов большая часть *p-n*-перехода закрыта контактным электродом, представляющим собой квадрат со стороной 500 мкм, в то время как размер мезы был равен 700×700 мкм.

Интегральную ампер-ваттную чувствительность тестовых фотодиодов оценим по формуле

$$S = dI / \Phi,$$

где dI — величина фототока;

Φ — мощность падающего потока излучения.

Для оценки фототока и мощности излучения возьмем эффективную площадь *p-n*-перехода равной $A_{eff} = (700 \cdot 10^{-4})^2 - (500 \cdot 10^{-4})^2 = 2,4 \cdot 10^{-3}$ см², тогда $dI = 4 \cdot 10^{-4} - 2,4 \cdot 10^{-3} = 9,6 \cdot 10^{-7}$ А.

Мощность излучения определим по формуле

$$\Phi = \sigma (T_f^4 - T_0^4) \xi \eta A_{eff} \sin^2 2\theta,$$

где $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴ — постоянная Стефана-Больцмана;
 $T_f = 295$ К — температура фона;
 $T_0 = 77$ К — температура фотоприемника;
 $\xi = 0,688$ — коэффициент пропускания окна из ZnSe;
 $\eta = 0,7$ — квантовый выход;
 $2\theta = 18,5^\circ$ — угол поля зрения.
 Получим $\Phi = 5,0 \cdot 10^{-7}$ Вт и $S = 1,92$ А/Вт.

Заключение

Продемонстрирована технология изготовления меза-фотодиодов путем имплантации ионов мышьяка в гетероэпитаксиальные слои КРТ *n*-типа. Отработана методика двухстадийного отжига, включающая в себя активацию мышьяка и заполнение генерируемых при этом вакансий ртути. Параметры тестовых фотодиодов сравнимы с лучшими достигаемыми параметрами для *p-n*-переходов с длинноволновой границей чувствительности 9,7 мкм.

Работа поддержана комплексным интеграционным проектом СО РАН 3.20.

Литература

1. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. — Новосибирск: Наука, 2003.
2. Мынбаев К. Д., Иванов-Омский В. И. // ФТП. 2006. Т. 40. С. 3—22.
3. Lopes V. C., Syllaios A. S. and Chen M. C. // Sem. Sci. Technol. 1993. V. 8. P. 824.
4. Васильев В. В., Придеин А. В. // Прикладная физика. 2005. № 6. С. 118—124.
5. Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н. и др. // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 1. С. 39—45.
6. Bubulac L. O., Lo D. S., Tennant W. E., Edwall D. D., Chen J. C., Ratusnik J., Robinson J. C. and Bostrup G. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 50. P. 22.
7. Bubulac L. O., Edwall D. D., McConnell D., DeWames R. E., Blazejewski E. R. and Gertner E. R. // Semicond. Sci. Technol. 1990. V. 5. P. 45—48.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

The photodiodes fabrication on a basis of *n*-HgCdTe by As⁺ implantation

V. V. Vasiliev, V. S. Varavin, T. I. Zakhaiash, D. Yu. Protasov, R. N. Smirnov,
 D. G. Ikusov

Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The p⁺-n-junction were fabricated by arsenic ion implantation into MBE n-HgCdTe/GaAs layers. The profiles of the arsenic distribution were measured by SIMS. For electric activation of the arsenic's atoms a two-stage annealing was used. The test diodes were fabricated using mesa-technology. For obtained photodiodes a dark current density is 0.04 A/cm² at reverse bias V = -0,1 V. The value of product R₀·A lays in a range 20—28 Ω·cm² for wavelength cutoff λ_s = 9.7 μm. The estimation of a integral amper-watt sensitivity gives value of S = 1.92 A/W.

УДК 621.315

Электрофизические и фотоэлектрические свойства МДП-структур на основе варизонного КРТ МЛЭ

А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, С. М. Дзядух
 СФТИ при ТГУ, г. Томск, Россия

В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, Ю. Г. Сидоров,
 В. В. Васильев, Т. И. Захарьяш, Ю. П. Машуков
 Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Экспериментально исследовано влияние сопротивления объема и приповерхностных варизонных слоев на электрофизические и фотоэлектрические характеристики МДП-структур, созданных на основе гетероэпитаксиального КРТ, выращенного методом моле