

зависимостей при низких температурах из-за исключения в случае наличия варизонного слоя туннельной генерации через глубокие уровни. При увеличении температуры спад fotocувствительности связан с процессами диффузии неосновных носителей заряда из объема эпитаксиальной пленки и не зависит от наличия варизонных слоев.

Литература

1. Рогальский А. Инфракрасные детекторы: Пер. с англ./ Под ред. А. В. Войцеховского. — Новосибирск: Наука, 2003. — 636 с.

2. Овсяк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др. Матричные фотоприемники инфракрасного диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001. — 376 с.

3. Войцеховский А. В., Давыдов В. Н. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников. — Томск: Радио и связь, 1990. — 327 с.

4. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М. // Известия вузов. Сер. Физика. 2005. № 6. С. 31—37.

5. Lopes V. C., Syllaios D., Chen M. C. // Semicond. Sci. Technol. 1993. V. 8. P. 824—841.

6. Войцеховский А. В. // Изв. вузов. Сер. Физика. 1994. № 2. С. 99—104.

7. Барышев Н. С., Гельмонт Б. Л., Ибрагимова М. И. // ФТП. 1990. Т. 24. № 2. С. 209—224.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

The electro-physical and photoelectrical properties of MIS-structures in base of graded-band MBE MCT

A. V. Voitsekhovskiy, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh
Siberian Physical-Technical Institute, Tomsk, Russia

V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, Yu. G. Sidorov, V. V. Vasiliev,
T. I. Zakharyash, Yu. P. Mashukov
Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, Russia

The influence of bulk resistance and near-layer graded-band layers on electrophysical and photoelectrical properties of MIS-structures in base of hetero-epitaxial MCT created by molecular-beam epitaxy was experimental investigated. It is shown that differential resistance of space-charge region in strong inversion for structure in base of MCT with $x = 0.22$ without graded-band layers is limited of tunnel recombination via deep levels.

УДК 621.383

Неохлаждаемый ФЭМ-детектор на основе CdHgTe для приема CO₂-лазерного излучения

А. А. Алиев, Т. И. Ибрагимов, Н. Д. Исмаилов, И. А. Насибов, Э. К. Гусейнов
Институт физики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

Рассмотрены состояние и перспективы развития неохлаждаемых фотоэлектромагнитных приемников излучения на основе КРТ-соединений.

Неохлаждаемые фотоэлектромагнитные приемники излучения (ФЭМ-детекторы) на основе твердых растворов теллурида кадмия ртути составов $x < 0,2$ находят применение в оптоэлектронных системах с использованием излучения CO₂-лазера с длиной волны 10,6 мкм [1]. К преимуществам таких детекторов можно отнести отсутствие внешнего электрического питания, что снижает уровень шумов и значительно уменьшает тепловую нагрузку на фотоприемник, а также высокое

быстродействие, что позволяет использовать их в гетеродинных системах регистрации.

В работе [2] нами был проведен теоретический расчет и представлены результаты разработки и исследования неохлаждаемого ФЭМ-приемника на основе Cd_xHg_{1-x}Te состава $x = 0,2$ для области спектра 6—7 мкм. В основу работы были заложены исследования параметров ФЭМ-детектора в зависимости от уровня акцепторного легирования полупроводника.

В настоящей работе представлены результаты исследования возможности повышения параметров ФЭМ-детектора на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ состава $x = 0,167$, что при комнатной температуре соответствует максимуму спектральной чувствительности на длине волны 10,6 мкм.

Теоретический расчет параметров ФЭМ-детектора и анализ результатов

Рассмотрим ФЭМ-детектор с составной фотоприемной площадкой толщиной d и общим размером $A = l \cdot w$, состоящей из трех полосок, каждая из которых имеет ширину w_s . При расчете параметров детектора за основу была принята та же методика, что и в работе [2], базировавшаяся на работе [3], в которых ФЭМ-эффект рассматривался в обобщенном виде для случая произвольных магнитных полей.

Рассмотрим случай, при котором толщина образца d много больше амбиполярной диффузионной длины L , а падающее излучение эффективно поглощается в объеме образца. При таких условиях выражение для тока короткого замыкания фотомангнитного эффекта принимает вид

$$I_{sc} = \frac{\eta W_\lambda}{h\nu} \cdot \frac{e\mu_h(b+1)BLw_s}{(1+S_1)} \cdot \frac{\alpha L}{\alpha L + 1}, \quad (1)$$

где η — квантовая эффективность, включая потери на отражение;

W_λ — мощность монохроматического излучения;

$h\nu$ — энергия квантов падающего излучения;

e — заряд электрона;

μ_h — подвижность дырок;

b — отношение подвижностей электронов и дырок;

B — магнитное поле;

α — коэффициент поглощения;

S_1 — безразмерный параметр, учитывающий вклад поверхностной рекомбинации;

L — длина амбиполярной диффузии в магнитном поле

$$L = \left[\frac{L_e^2(n+p)}{p(1+\mu_e^2B^2) + bn(1+\mu_h^2B^2)} \right]^{\frac{1}{2}},$$

где L_e — длина диффузии электронов;

μ_e — подвижность электронов.

$$S_1 = \frac{S_1\tau}{L},$$

где s_1 — скорость поверхностной рекомбинации на передней грани;

τ — время жизни электронов и дырок.

В соответствии с формулой (1) монохроматическая вольтовая чувствительность ФЭМ-детектора определяется выражением

$$R_\lambda = \frac{I_{sc}r}{W_\lambda/w} = \frac{\eta}{h\nu} \cdot \frac{e\mu_h(b+1)BLw_s}{(1+S_1)lw} \cdot \frac{\alpha L}{\alpha L + 1} r, \quad (2)$$

где r — сопротивление ФЭМ-детектора в магнитном поле B и для детектора с чувствительной площадкой из m полосок может быть представлено в виде

$$r = \frac{ml}{e\mu_h(bn+p)w_s d} \left[1 - \frac{np(b+1)^2 \mu_e \mu_h B^2 L^2}{L_e^2(n+p)(bn+p)} \right]^{-1}. \quad (3)$$

Отсюда видно, что применение составной площадки при условии $m \cdot w_s \approx w$ позволяет увеличить вольтовую чувствительность детектора почти в m раз. Обнаружительная способность ФЭМ-детектора выражается формулой

$$D_\lambda^* = \frac{R_\lambda}{U_n} \sqrt{A\Delta f},$$

где U_n — напряжение шума;

Δf — полоса пропускания частот усилительного тракта.

Доминирующим шумом ФЭМ-детектора является тепловой, напряжение которого определяется выражением

$$U_n = \sqrt{4k_B T r \Delta f},$$

где k_B — постоянная Больцмана;

T — температура.

Обнаружительная способность для детектора с составной площадкой при соблюдении вышеприведенного условия практически не меняется.

Для вычисления основных фотоэлектрических параметров, вольтовой чувствительности R_λ и обнаружительной способности D_λ^* в зависимости от степени легирования материала z была использована та же методика, что и в работе [2], но в отличие от упомянутой работы ширина запрещенной зоны вычислялась по формуле, более точно описывающей зависимость E_g при $x < 0,2$ [4], т. е.

$$E_g = -0,303 + 5,6 \cdot 10^{-4} T(1-2x) + 1,73x + 0,25x^4. \quad (4)$$

Далее для вычислений применялись формулы (10)—(16) из работы [2] и данные, которые были использованы в этих формулах.

Фотоэлектрические параметры вычислялись для фотоприемной площадки, состоящей из трех полосок (каждая шириной 300 мкм) и имеющей общий размер $A = 1 \times 1$ мм. Значение магнитной индукции принималось равным 0,5—1,5 Тл.

Для вычисления длины амбиполярной диффузии сначала были вычислены подвижность электронов по эмпирической формуле [5], достаточно хорошо описывающей ее температурную зависимость для несильно легированных материалов, и длина пробега электронов в зависимости от степени компенсации:

$$\mu_e = 9 \cdot 10^4 (m_e T)^{-3/2}, \quad L_e = [\mu_e \tau(z) k_B T]^{1/2}.$$

По приведенным выше формулам рассчитывались длина амбиполярной диффузии, вольтовая чувствительность и обнаружительная способность. Ширина запрещенной зоны материала, вычисленная по формуле (4), для $x = 0,167$ составляла 0,098 эВ при $T = 300$ К. В соответствии с данными работы [6] коэффициент поглощения был принят равным 1700 см^{-1} при длине волны 10,6 мкм, значение скорости поверхностной рекомбинации было принято равным 100 см/с , а квантовая эффективность — 1.

Проведенный расчет зависимости времени жизни от степени акцепторного легирования z показал, что эта зависимость имеет максимальное значение при степени легирования, равной $1,55 n_i$ и не зависит от величины магнитного поля. По достижении максимального значения время жизни с увеличением степени компенсации убывает по пологой гиперболе почти на порядок.

В то же время такие важные параметры, как длина амбиполярной диффузии L и сопротивление r , зависят как от степени легирования, так и от значения магнитного поля. Оба параметра имеют максимумы при определенной степени компенсации z , значение которой с ростом приложенного магнитного поля уменьшается. При этом для L оптимальные значения степени компенсации при полях $B = 0,5—3,0$ Тл находятся в интервале $z = 2—4 n_i$, но абсолютные значения уменьшаются с увеличением поля. Сопротивление r достигает максимума в более широком интервале степени легирования — от 4 до $8 n_i$, причем, чем больше поле, тем больше максимальные значения r . Вычисленные при четырех значениях магнитного поля зависимости этих параметров от степени компенсации приведены на рис. 1.

Вольтовая чувствительность и обнаружительная способность имеют схожую, но также немонотонную зависимость от степени легирования. Оба параметра имеют максимальные значения, которые при полях $B = 0,5—3,0$ Тл лежат в интервале $z = 3,2—5,5 n_i$ для R_λ и $z = 2,6—4,6 n_i$ — для D_λ . Наибольшие значения этих параметров достигаются при больших полях. Необходимо также отметить, что чем больше поле, тем резче рост и спад в зависимости от степени легирования, что приводит к смещению оптимального уровня компенсации в меньшую сторону. При оптимальной степени легирования вольтовая чувствительность возрастает в 8—15 раз, а обнаружительная способность повышается в 2,5—6 раз. На рис. 2 приведены зависимости этих параметров от степени компенсации при четырех значениях магнитного поля.

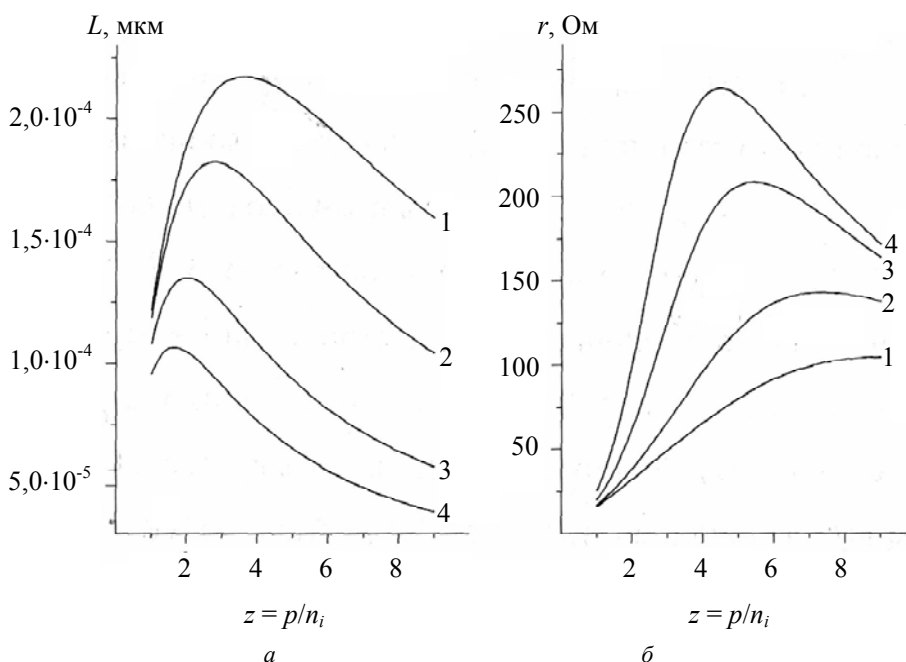
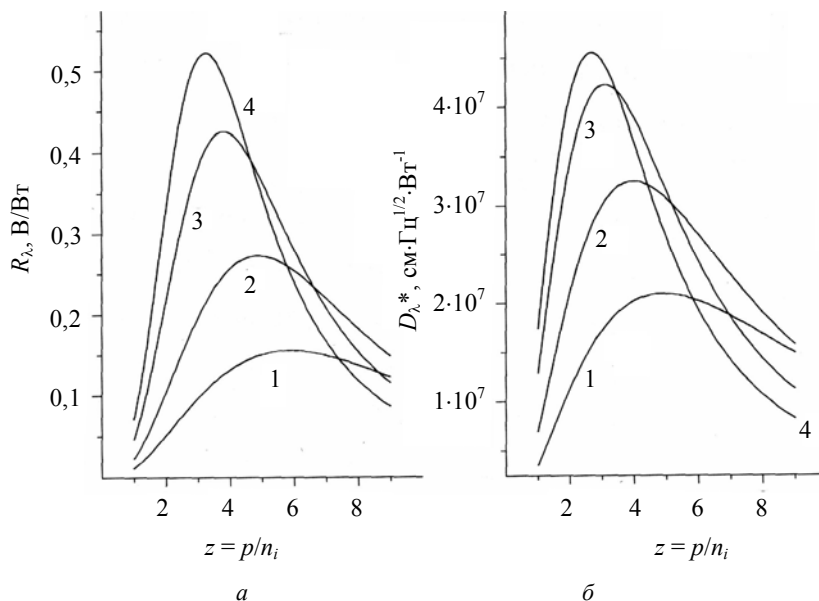


Рис. 1. Зависимости длины L амбиполярной диффузии (а) и сопротивления r (б) от степени легирования при различных значениях магнитного поля B , Тл: 1 — 0,5; 2 — 1,0; 3 — 2,0; 4 — 3,0

Рис. 2. Зависимости вольт-ваттной чувствительности (а) и удельной обнаружительной способности (б) от степени легирования при различных значениях магнитного поля В, Тл: 1 — 0,5; 2 — 1,0; 3 — 2,0; 4 — 3,0



Из приведенных графиков также видно, что при бóльших степенях компенсации значения R_λ и D_λ оказываются выше при меньших полях. При этом обнаружительная способность и вольтовая чувствительность уменьшаются примерно на 20 % от максимального значения, тогда как время жизни уменьшается более чем в 2 раза. Это позволяет в зависимости от поставленной задачи (быстродействие либо высокая чувствительность) варьировать параметры изготавливаемого детектора и приложенное магнитное поле.

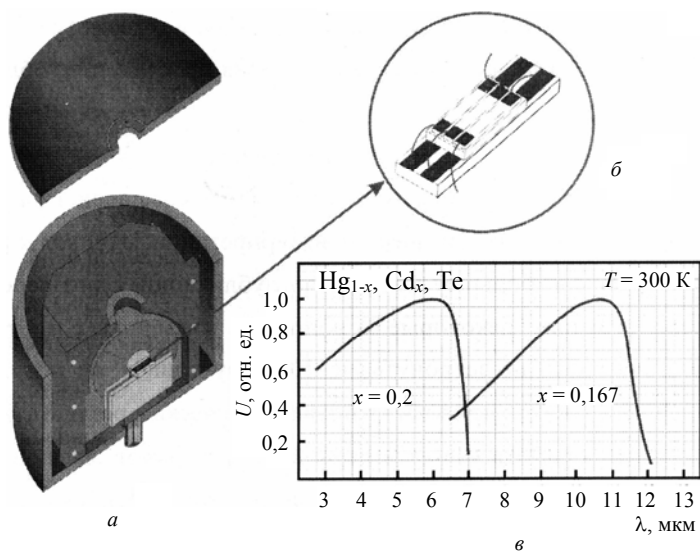
Полученные результаты можно объяснить следующим образом. Из формул (2) и (3) видно, что R_λ прямо пропорционально приложенному полю и обратно пропорционально квадрату степени компенсации. На основании этого можно заключить, что до определенной концентрации носителей доминирующую роль в изменении параметров играет значение приложенного магнитного поля, однако в дальнейшем рост концентрации сказывается

значительно сильнее, что, соответственно, и приводит к уменьшению параметров детектора.

Конструкция и фотоэлектрические параметры ФЭМ-детектора

Аналогично приведенным в [2] технологии и конструкции нами был изготовлен ФЭМ-детектор из $Cd_xHg_{1-x}Te$ состава $x = 0,167$. Сопротивление изготовленного детектора составляло около 130 Ом при температуре $T = 300$ К. Спектральная характеристика ФЭМ-детектора показана на рис. 3, из которого видно, что максимум спектральной характеристики находится в районе 10,6—11,0 мкм. На длине волны 10,6 мкм чувствительность составляет не менее 95 %. Вольтовая чувствительность и удельная обнаружительная способность (на частоте 1200 Гц) составили, соответственно, 0,24 В/Вт и $0,18 \cdot 10^8$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹.

Рис. 3. Общий вид изготовленного неохлаждаемого ФЭМ-детектора (а); вид чувствительного элемента (б) и спектральных характеристик (в) детекторов, изготовленных из материала различного состава



Таким образом, проведенные расчеты показали что, применяя оптимальное акцепторное легирование, можно в значительной степени повысить параметры ФЭМ-детектора, изготовленного на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ состава $x = 0,167$. Оптимальный уровень акцепторного легирования лежит в области концентраций (4—5) n_i . Изготовлен ФЭМ-детектор с составной чувствительной площадкой с максимумом чувствительности в районе 10,6 мкм, позволяющей значительно повысить напряжение выходного сигнала и вольттовую чувствительность.

Л и т е р а т у р а

1. *Piotrowski Y., Galus W. and Grudzien M.* // Infrared Phys. 1991. № 31. P. 1.
2. *Gaziyev F. N., Nasibov I. A., Ibragimov T. I., Huseynov E. K.* HgCdTe based PEM detector for middle range of IR spectrum: 18th Int. Conf. on Photoelectronics and Night Vision Device, 25—28 May 2004, Moscow, Russia, Proc. of SPIE. 2005. V. 5834. P. 123—132.
3. *Lile D.* // Phys. Rev. B. 1973. № 8. P. 4708.
4. *Scott M. W.* // J. Appl. Phys. 1969. V. 40. P. 4077.
5. *Gordon N. T., Barton S., Capper P., Jones C. L. and Medcalfe N.* // Semicond. Sci. Technol. 1993. № 8. P. 221—224.
6. *Hansen G. L., Schmidt Y. L. and Casselman T. N.* // J. Appl. Phys. 1982. № 53. P. 7099.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

Uncooled CdHgTe photo-electromagnetic detector for receiving a CO₂-laser radiation

A. A. Aliev, T. I. Ibragimov, N. D. Ismayilov, I. A. Nasibov, E. K. Guseynov
Institute for Physics, Baku, Azerbaijan

Consideration is made to a state and future trends of development for uncooled CdHgTe photo-electromagnetic detectors.

УДК 621.5

Результаты разработки ряда модульных МКС Сплит-Стирлинг для криостатирования ФПУ 1- и 2-го поколений

М. В. Липин, А. В. Громов
ООО «НТК "Криогенная техника"», Омск, Россия

Представлены результаты разработки и испытаний ряда модульных микрокриогенных систем (МКС) Сплит-Стирлинг, предназначенных для комплектации тепловизионных приборов наблюдения и прицеливания всех родов войск. Разработанные МКС позволяют криостатировать фоточувствительные элементы (ФЧЭ) фотоприемных устройств (ФПУ) различного типа на температурном уровне 75—80 К при тепловой нагрузке на МКС 0,3—2,0 Вт. Рассмотрены ближайшие перспективы совершенствования конструкции и улучшения характеристик.

На протяжении почти 50 лет наша компания является разработчиком и изготовителем МКС Стирлинг и Сплит-Стирлинг с высокими показателями надежности. Эти изделия предназначены в основном для криостатирования ФПУ, используемых в военной и космической технике.

В конце XX века для криостатирования ФПУ искусственных спутников Земли серий "Ресурс-О", "Изумруд-М", "Метеор-3" и межпланетного аппарата "Фобос" были разработаны МКС Стирлинг с ресурсом от 2-х до 5-ти тыс. ч, позволившие постоянно наблюдать за определенными участками земной поверхности, а также расширившие научные представления о развитии Солнечной системы [1, 2].

В рамках Федеральной комплексно-целевой программы развития систем тепловидения и приборов ночного видения нашим предприятием разработаны базовые конструкции трех классов микрокриогенных систем Сплит-Стирлинг с линейным приводом, предназначенных для криостатирования многоэлементных фотоприемников (ФП) перспективных модульных тепловизионных приборов (ТВП) наблюдения и прицеливания нового поколения для всех родов войск. ОКР выполнялась по заданию Минобороны России и имела шифр "Оператор-Ф".