

Моделирование зонных диаграмм барьерных структур на основе КРТ

А. В. Войцеховский, Д. И. Горн, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов

В данной статье представлен анализ зонных диаграмм барьерных фоточувствительных структур на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) для средней и дальней области излучения инфракрасного диапазона, работающих при температурах, близких к комнатным. Целью работы было формирование методики расчёта профилей энергетических зон в подобных структурах, учитывающей особенности реальных структур, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Проведены расчёты зонных диаграмм реальной фоточувствительной структуры на основе КРТ, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии в ИФП СО РАН (Новосибирск).

Ключевые слова: КРТ, $Cd_xHg_{1-x}Te$, фотодетектор, барьерная структура, nVn .

Ссылка: Войцеховский А. В., Горн Д. И., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 50.

Reference: A. V. Voitsekhovskii, D. I. Gorn, S. A. Dvoretzky, and N. N. Mikhailov, Prikl. Fiz., No. 5, 50 (2018).

Введение

Известно, что основным подходом в вопросе минимизации тепловой генерации в активной области инфракрасного (ИК) фотодетектора без криогенного охлаждения является подавление механизмов Оже с неравновесным обеднением полупроводника [1], а также использование новых естественных и модифицированных полупроводниковых материалов и полупроводниковых структур с пониженной тепловой генерацией. В 2006 году Maimon и Wicks [2] предложили концепцию так называемой барьерной фоточувствительной nVn -структуры. Здесь за счёт введения широкозонного барьера (при отрицательном смещении структуры для основных носителей заряда) создаётся потенциальный барьер и происходит подавление темновых токов, вызванных основными но-

сителями [3]. Основная проблема реализации nVn -фотодиодов для материала $CdHgTe$ (КРТ) заключается в том, что в отличие от материалов группы A^3B^5 , для которых изначально была предложена концепция барьерных структур, в гетероструктурах на основе КРТ разрыв валентной зоны имеет значительную величину. Это приводит к образованию некоторого потенциального барьера также и для неосновных носителей заряда, что негативно влияет на преимущества, которые даёт применение nVn -структур.

Основной задачей при создании nVn -фотодетектора на основе КРТ с характеристиками, соответствующими $p-n$ -фотодиодам на основе КРТ, является задача устранения барьера для неосновных носителей заряда в структуре. Существует несколько вариантов решения данной проблемы, а именно: увеличение внешнего смещения [4–6], управление параметрами слоёв и, главным образом, акцепторное легирование барьерного слоя [3, 7, 8], а также использование многослойных барьеров, включая барьеры в виде сверхрешёток [9, 10, 11]. Детальный анализ современных тенденций в развитии технологии барьерных фоточувствительных структур на основе КРТ для средней и дальней области излучения инфракрасного диапазона, работающих при температурах, близких к комнатным, был проведён нами в [12].

С точки зрения практической реализации приборных структур на основе материала КРТ, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), наиболее применимым видится способ устранения барьера за счёт выбора подхо-

Войцеховский Александр Васильевич¹, зав. кафедрой, д.ф.-м.н.

Горн Дмитрий Игоревич¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Дворецкий Сергей Алексеевич², руководитель отдела, к.ф.-м.н.

Михайлов Николай Николаевич², с.н.с., к.ф.-м.н.

¹Томский государственный университет.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Тел. (3822) 413-517.

E-mail: vav43@mail.tsu.ru; gorn_dim@sibmail.com

²Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.

Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

Тел. (383) 330-90-55.

E-mail: dvor@isp.nsc.ru; ifp@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 24 мая 2018 г.

дающего напряжения смещения и проектирования приборной структуры соответствующей архитектуры, обеспечивающей зонную диаграмму с минимальной величиной барьера.

В соответствии со сказанным, целью настоящей работы было формирование методики расчёта профилей энергетических зон в барьерных фоточувствительных структур на основе КРТ для средней и дальней области излучения инфракрасного диапазона, учитывающей особенности реальных структур, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, а также моделирование зонных диаграмм структур на основе КРТ со встроенными слоями с повышенным составом (барьерные слои) для разработки фотодиодных фотоприёмных устройств ИК-диапазона с повышенной рабочей температурой.

Методика расчёта

Для расчёта профиля электростатического потенциала нами решалось уравнение Пуассона, которое для структуры КРТ МЛЭ n -типа имеет следующий вид:

$$\frac{d^2\varphi(z)}{dz^2} = \frac{1,8 \times 10^{-8}}{\varepsilon(z)} \left[n_0 \exp\left(\frac{(q\varphi(z) + \Delta\chi(z))}{kT}\right) \left(\frac{m_c^*(z)}{m_c^*}\right)^{3/2} - p_0 \exp\left(-\frac{(q\varphi(z) + \Delta\chi(z) + \Delta E_g(z))}{kT}\right) - N_d^{+int}(z) - N_d^{+dop}(z) \right]$$

Величины $\Delta\chi$ и ΔE_g представляют собой разности между значениями электронного средства и ширины запрещённой зоны в рассматриваемой точке структуры с координатой z и их значениями в некоторой опорной точке в однородном слое структуры, например, в поглощающем слое вдали от гетерограницы, где электростатический потенциал однороден.

Зависимость электронного средства от состава КРТ и температуры была определена нами самостоятельно, исходя из представлений об уровне локальной электронейтральности, и имеет следующий вид [13, 14]:

$$\chi(x, T) = 5,59 - 1,29x + 0,54x^2 - 0,56x^3 + 7,13 \times 10^{-4}Tx.$$

Анализ результатов расчёта

Нами были проведены расчёты энергетических диаграмм nVn -структур, выращенных в ИФП

$$\frac{d}{dz} \left(\varepsilon(z) \frac{d\varphi(z)}{dz} \right) = \frac{q}{\varepsilon_0} \left[n(z, \varphi) - p(z, \varphi) - N_d^{+int}(z) - N_d^{+dop}(z) \right],$$

где φ – электростатический потенциал в структуре; ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала; n, p – концентрации электронов и дырок; N_d^{+int}, N_d^{+dop} – концентрации ионизированных донорных центров, обусловленных собственными дефектами и легирующей примесью, соответственно. Композиционная зависимость величины N_d^{+int} имеет следующий вид:

$$N_d^{+int}(x) = (1,26x - 0,26) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}.$$

Используя явный вид для выражений n, p , описывающих распределение концентрации носителей заряда в структуре с неоднородным потенциальным профилем, которые были получены нами ранее, получим общий вид уравнения Пуассона для рассматриваемой структуры:

СО РАН, и проведена оценка влияния величины приложенного смещения на высоту барьера для дырок. Исследуемая структура включала поглощающий слой с составом 0,29 мол. дол. и толщиной 2,7 мкм, а также барьерный слой с составом 0,67 мол. дол. и толщиной 0,2 мкм. Параметры структуры: $n_{77} = 60 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\mu_{77} = 22 \times 10^3 \text{ см}^2/(\text{В с})$, скорость роста 1,5 мкм/час.

Профили состава и легирования для данной структуры приведены на рис. 1. Результаты расчёта зонных диаграмм исследуемой структуры при различной величине напряжения смещения приведены на рис. 2.

Видно, что при увеличении смещения геометрия барьера существенным образом меняется, а именно, барьер становится треугольным. Высота барьера для дырок становится меньше, ослабляя барьер для тока неосновных носителей, что должно приводить к увеличению обнаружительной способности.

Одновременно нами были рассчитаны энергетические диаграммы исследуемой структуры,

находящейся под постоянным внешним смещением, при различных температурах. Результаты расчётов приведены на рис. 3.

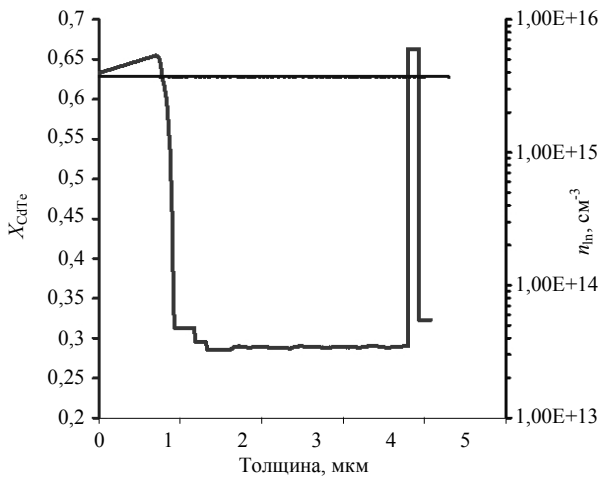


Рис. 1. Распределение состава и легирующей примеси для структуры nVn , выращенной в ИФП СО РАН.

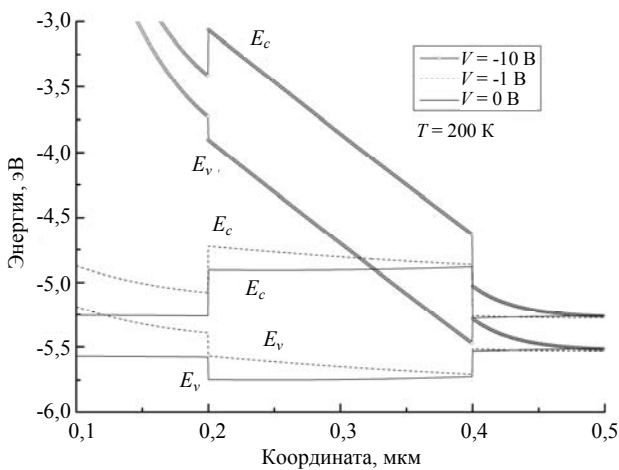


Рис. 2. Рассчитанные зонные диаграммы в области барьера для рассматриваемой структуры при трёх смещениях – 0, –1, –10 В – при постоянной температуре.

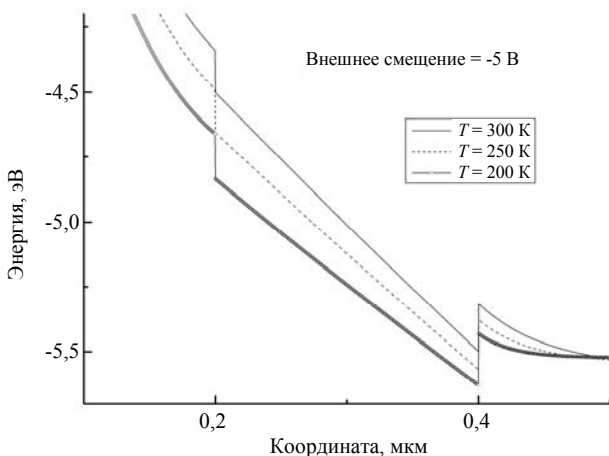


Рис. 3. Рассчитанные профили валентной зоны в области барьера для рассматриваемой структуры при трёх температурах – 200 К, 250 К, 300 К – при постоянном внешнем смещении.

Из приведённых на рис. 3 кривых видно, что при увеличении температуры величина барьера для дырок в структуре n -типа уменьшается. Это должно способствовать повышению квантовой эффективности работы фоточувствительной структуры при более высоких температурах при условии подавления тепловой генерации носителей.

Также нами было проведено сравнение результатов расчёта зонных диаграмм барьерных структур nVn на основе КРТ с диаграммами, полученными авторами работы [4], в которой проведено численное моделирование энергетических диаграмм фоточувствительной nVn -структуры с поглощающим слоем $Cd_{0,275}Hg_{0,725}Te$ и со сложным трёхслойным барьером, включающим центральный слой с $Cd_{0,6}Hg_{0,4}Te$ и два окружающих его слоя с переменным составом.

Заключение

В работе показано, что барьерные структуры типа nVn представляют собой альтернативу для создания фотодиодных приёмников излучения среднего и дальнего ИК-диапазона за счёт имеющейся возможности оптимизации барьерной структуры с целью снижения темновых токов и повышения чувствительности. Их использование позволяет исключить из процесса выращивания фотодиодной структуры технологическую операцию создания p -области исходной гетероструктуры n -типа, а именно, легирование акцепторными примесями (в том числе полную имплантацию) и последующий активационный отжиг.

На настоящий момент существует ещё ряд нерешённых конструктивных и технологических задач в вопросе создания подобных детекторов. Наличие барьера для дырок в валентной зоне в структурах nVn на основе материала КРТ требует ряда технологических решений, которыми являются, например, использование больших значений внешнего смещения, управление параметрами барьерного слоя, а также использование сложных многослойных барьеров.

В работе предложена методика расчёта энергетических диаграмм барьерных фоточувствительных структур на основе КРТ для средней и дальней области излучения инфракрасного диапазона, учитывающая особенности реальных структур, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Проведены расчёты энергетических диаграмм реальной барьерной nVn -структуры на основе КРТ, выращенной методом МЛЭ в ИФП СО РАН. На основании расчёта показано влияние величины приложенного смещения на высоту барьера для дырок в структуре nVn на основе КРТ n -типа. Также продемонстрирована

зависимость высоты барьера для неосновных носителей заряда в структуре от температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ashley T., Elliott C. T. // Electron. Lett. 1985. Vol. 21. P. 451.
2. Maimon S., Wicks G. W. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 151109.
3. Kopytko M., Kęblowski A., Gawron W., Madejczyk P. // Opto-Electronics Review. 2015. Vol. 23 (2). P. 143.
4. Martyniuk P., Rogalski A. // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. 2013. Vol. 61. No. 1. P. 211.
5. Ye Z. H., Chen Y. Y., Zhang P., Lin C., Hu X. N., Ding R. J., He L. // Proc. of SPIE. 2014. Vol. 9070. P. 90701L-1.
6. Akhavan N. D., Jolley G., Umana-Membreno G. A., Antoszewski J., Faraone L. // Journal of Electronic Materials. 2015. Vol. 44. No. 9. P. 3044.
7. Kopytko M. // Infrared Physics & Technology. 2014. Vol. 64. P. 47.
8. Ting D. Z., Soibel A., Khoshakhlagh A., Gunapala S. D. // Optical Engineering. 2017. Vol. 56 (9). P. 091606.
9. Kopytko M., Wrobel J., Jozwikowski K., Rogalski A., Antoszewski J., Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Faraone L., Becker C. R. // Journal of Electronic Materials. 2015. Vol. 44. No. 1. P. 158.
10. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Gu R., Asadnia M., Antoszewski J., Faraone L. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2016. Vol. 63. No. 12. P. 4811.
11. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Gu R., Antoszewski J., Faraone L. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2018. Vol. 65. No. 2. P. 591.
12. Voitsekhovskii A. V., Gorn D. I. // Journal of Communications Technology and Electronics. 2017. Vol. 62. No. 3. P. 314.
13. Gorn D. I., Voitsekhovskii A. V., Izhnin I. I. // Russian Microelectronics. 2013. Vol. 42. No. 8. P. 525.
14. Войцеховский А. В., Горн Д. И. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 5.

PACS: 78.55.Et

Modeling of band diagrams of barrier structures based on CdHgTe

A. V. Voitsekhovskii¹, D. I. Gorn¹, S. A. Dvoretzky², and N. N. Mikhailov²

¹National Research Tomsk State University

36 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia

E-mail: vav43@mail.tsu.ru; gorn_dim@sibmail.com

²Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the SB RAS

13 Lavrentieva av., Novosibirsk, 630090, Russia

E-mail: dvor@isp.nsc.ru; ifp@isp.nsc.ru

Received May 24, 2018

It is known that it is required deep cooling to achieve high sensitivity and reduced noise levels in semiconductor infrared (IR) photodetectors. This is due to a quite high level of charge carriers thermal generation in the narrow band-gap semiconductor material. In this regard, at present there are a lot of basic and applied research devoted to finding innovative ways to improve the performance and reduce the cost of IR photodetectors, including the development of new types of photodetectors. One of the main trends in the development of the technology of IR photodetectors is to increase the operating temperature of the device and seek a complete rejection of cryogenic cooling systems that significantly increase the cost of the device and narrow its scope. Barrier CdHgTe-based nBn type structures are analyzed in this paper. At present such structures is considered as an alternative to creating a photodiode for middle and far infrared range. There are a number of unresolved structural and technological problems in the issue of the creation of such detectors. The presence of a barrier for holes in the valence band in the CdHgTe-based nBn structures requires a number of technological solutions, which are: the use of large external bias values, precise barrier layer parameters control including an acceptor doping of the barrier, and use of complex multi-layer barriers including the superlattices. The method of calculation of energy diagrams of barrier photosensitive structures based on MCT for medium and far infrared ranges is proposed, which takes into account the features of real structures grown by molecular beam epitaxy. The energy diagrams of the real barrier nBn structure based on MCT, grown by the MBE method at the ISP SB RAS, are calculated. Based on the calculation, the effect of the magnitude of the applied bias on the height of the barrier for holes in the nBn structure based on

the n-type MCT is shown. Also, the dependence of barrier height for minority charge carriers in the structure on temperature is demonstrated.

Keywords: MCT, $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, photodetector, barrier structure, $n\text{Bn}$.

REFERENCES

1. T. Ashley and C. T. Elliott, *Electron. Lett.* **21**, 451 (1985).
2. S. Maimon and G. W. Wicks, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 151109 (2006).
3. M. Kopytko, A. Kęblowski, W. Gawron, and P. Madejczyk, *Opto-Electronics Review* **23** (2), 143 (2015).
4. P. Martyniuk and A. Rogalski, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences* **61** (1), 211 (2013).
5. Z. H. Ye, Y. Y. Chen, P. Zhang, C. Lin, X. N. Hu, R. J. Ding, and L. He, *Proc. of SPIE* **9070**, 90701L-1 (2014).
6. N. D. Akhavan, G. Jolley, G. A. Umana-Membreno, J. Antoszewski, and L. Faraone, *Journal of Electronic Materials* **44** (9), 3044 (2015).
7. M. Kopytko, *Infrared Physics & Technology* **64**, 47 (2014).
8. D. Z. Ting, A. Soibel, A. Khoshakhlagh, and S. D. Gunapala, *Optical Engineering* **56** (9), 091606 (2017).
9. M. Kopytko, J. Wrobel, K. Jozwikowski, A. Rogalski, J. Antoszewski, N. D. Akhavan, G. A. Umana-Membreno, L. Faraone, and C. R. Becker, *Journal of Electronic Materials* **44** (1), 158 (2015).
10. N. D. Akhavan, G. A. Umana-Membreno, R. Gu, M. Asadnia, J. Antoszewski, and L. Faraone, *IEEE Transactions on Electron Devices* **63** (12), 4811 (2016).
11. N. D. Akhavan, G. A. Umana-Membreno, R. Gu, J. Antoszewski, and L. Faraone, *IEEE Transactions on Electron Devices* **65** (2), 591 (2018).
12. A. V. Voitsekhovskii and D. I. Gorn, *Journal of Communications Technology and Electronics* **62** (3), 314 (2017).
13. D. I. Gorn, A. V. Voitsekhovskii, and I. I. Izhnin, *Russian Microelectronics* **42** (8), 525 (2013).
14. A. V. Voitsekhovskii and D. I. Gorn, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 5 (2013).