

УДК 621.383

Анализ барьерных структур типа nBn для фотодиодных приёмников ИК-излучения

А. В. Войцеховский, Д. И. Горн

В данной статье представлен анализ современных тенденций в развитии технологии барьерных фоточувствительных структур на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) для среднего и дальнего инфракрасного (ИК) диапазонов, работающих при температурах, близких к комнатным. Рассмотрены и проанализированы основные подходы к решению задачи повышения рабочей температуры фотодиодного приёмника.

PACS: 72.40.+w

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

Введение

Известно, что полупроводниковые фотоприёмные устройства инфракрасного (ИК) излучения для достижения высоких значений чувствительности, а также снижения уровней шума требуют глубокого охлаждения. Это обусловлено достаточно высоким уровнем тепловой генерации носителей заряда в узкозонном полупроводниковом материале.

В связи с этим в настоящее время большое количество фундаментальных и прикладных научных исследований посвящено поиску инновационных путей улучшения характеристик и уменьшения стоимости ИК-фотодетекторов, в т. ч. и путем разработки фотодетекторов новых типов. Одним из основных трендов в части развития технологии фотоприёмных ИК-устройств является повышение рабочей температуры прибора и в перспективе полный отказ от использования криогенных систем охлаждения, которые существенным образом удорожают прибор и сужают области его применения.

Основным подходом в вопросе минимизации тепловой генерации в активной области детектора 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 nBn -структуры, которую конструктивно часто сравнивают с классическим $p-n$ -фотодиодом, в котором область пространственного заряда $p-n$ -перехода заменена на широкозонный барьер B , а p -область — на контакт n -типа. Второй n -слой выполняет роль активной поглощающей области. За счёт введения широкозонного барьера при отрицательном смещении структуры (когда отрицательный потенциал приложен к контакту n -типа) для основных носителей заряда (электронов в случае структуры nBn) создаётся потенциальный барьер и происходит подавление темновых токов, вызванных основными носителями, но при этом не создаётся барьер для тока фотогенерированных неосновных носителей заряда [3]. Введение широкозонного барьера вместо области пространственного заряда $p-n$ -фотодиода позволяет также уменьшить вклад в темновой ток генерационно-рекомбинационного механизма Шокли-Рида-Холла.

Основная проблема реализации nBn -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

Войцеховский Александр Васильевич, заведующий кафедрой.
Горн Дмитрий Игоревич, старший научный сотрудник.
Томский государственный университет.
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.
Тел. (3822) 413-517.
E-mail: vav43@mail.tsu.ru; gorn_dim@sibmail.com

Статья поступила в редакцию 8 июня 2016 г.

© Войцеховский А. В., Горн Д. И., 2016

влияет на преимущества, которые даёт применение nVn -структур.

Анализ литературных данных

Исходя из сказанного, 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.

Увеличение внешнего смещения. В работе [4] авторами проводилось моделирование энергетической диаграммы nVn -гетероструктуры с поглощающим слоем $Cd_{0,275}Hg_{0,725}Te$ и трёхслойным

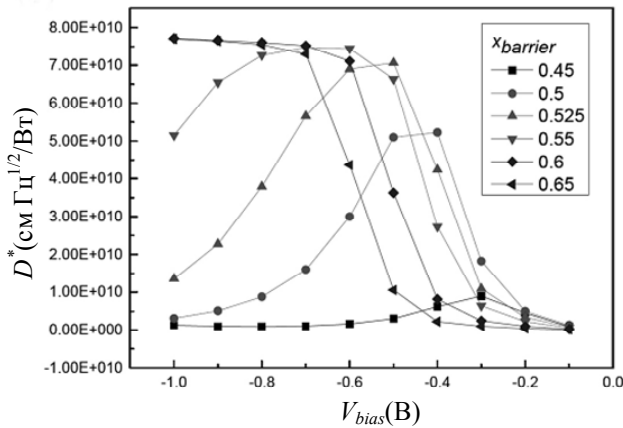


Рис. 1. Рассчитанные зависимости обнаружительной способности фотодетектора на основе nVn -структуры, рассмотренного в [4] от величины внешнего смещения при различных значениях состава барьерного слоя.

Из представленных на рис. 1 зависимостей видно, что барьерные слои с большим составом обеспечивают лучшие значения обнаружительной способности прибора D^* , что объясняется более эффективным экранированием тока основных носителей заряда в структуре с более широкозонным барьером. При этом наличие барьера для дырок в валентной зоне обуславливает низкие значения обнаружительной способности при нулевом и малом (до $-0,3$ В) внешнем смещении. При увеличении отрицательного внешнего смещения геометрия потенциальных барьеров претерпевает существенные изменения, как для электронов, так и для дырок. При увеличении смещения высота барьера для дырок становится меньше, что уменьшает барьер для тока неосновных носителей и приводит к увеличению обнаружительной способности. Однако при слишком больших значениях смещения (например при напряжении смещения более $-0,6$ В для состава барьера $0,55$ мол. дол.) су-

барьером, центральная часть которого состояла из $Cd_{0,55}Hg_{0,45}Te$, а граничными слоями были варизонные структуры, плавно изменяющие состав до составов контактного и поглощающего слоёв. Следует отметить, что в рассматриваемой структуре применялся неоднородный профиль легирования донорной примесью. Также в описываемой работе проводилось моделирование обнаружительной способности и фотодетектора на её основе. Расчёты проводилось при температуре детектора 180 К.

Рисунки 1 и 2 демонстрируют результаты моделирования обнаружительной способности фотодетектора при различных отрицательных смещениях и при варьировании параметрами структуры — составами барьерного и контактного слоёв.

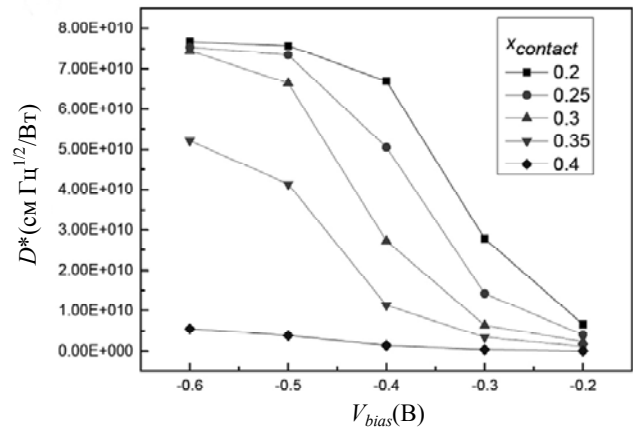


Рис. 2. Рассчитанные зависимости чувствительности фотодетектора на основе nVn -структуры, рассмотренного в [4] от величины внешнего смещения при различных значениях состава контактного слоя.

щественной становится изменение вида барьера в зоне проводимости: его форма стремится к треугольной, возрастает туннельная прозрачность барьера и уменьшается эффективность экранирования тока основных носителей, что приводит к последующему снижению значений обнаружительной способности.

Аналогичным образом можно описать и влияние состава контактного слоя на обнаружительную способность фоточувствительной nVn -структуры, которая иллюстрируется на рис. 2. Увеличение состава контактного слоя будет приводить к уменьшению разрыва в зоне проводимости ΔE_c , что будет негативно сказываться на экранировании тока основных носителей заряда.

Аналогичные результаты были получены также в работах [5, 6].

Управление параметрами барьерного слоя. Данный механизм был описан, например, в работах [3, 7]. Суть методики заключается в том, чтобы

подобрать параметры барьера (тип проводимости, уровень легирования, толщина и состав) с целью минимизации барьера для неосновных носителей заряда в структуре. Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям, описанным в литературе, структуры с барьерами *p*-типа проводимости демонстрируют лучшие характеристики, чем структуры с барьерами *n*-типа. Согласно данным работы [7], посредством прецизионного акцепторного легирования барьерной области можно практически полностью устранить потенциальный барьер для дырок при определённом внешнем смещении. Из представленных в работе данных видно, что в случае акцепторного легирования барьерного слоя при внешнем смещении $-0,6$ В удаётся практически полностью устранить барьер для дырок.

Однако следует отметить, что процесс выращивания гетероструктур КРТ методом молекулярно-лучевой эпитаксии позволяет получать материал *p*-типа проводимости только после *ex situ* активации имплантированных акцепторов, что накладывает серьёзные ограничения на практическую реализацию массового производства $nB_p n$ -фотодиодов. В связи с этим, использование барьера *p*-типа проводимости оправдано при выращивании гетероструктур методом газовой эпитаксии из металлорганических соединений (ГФЭМОС, МOCVD), который позволяет получать *in situ* материал как донорного, так и акцепторного типов проводимости.

Использование многослойных барьеров, включая барьеры в виде сверхрешёток. Авторы работы [8] своими исследованиями подтверждают выводы о том, что барьерный слой *p*-типа позволяет значительно уменьшить потенциальный барьер для дырок. Однако введение в структуру *n*-типа проводимости барьерного слоя с *p*-типом проводимости приведёт к образованию областей пространственного заряда вблизи интерфейсов «контактный *n*-слой — барьер *p*-типа» и «барьер *p*-типа — поглощающий *n*-слой», что в свою очередь приведёт к возрастанию вклада в темновой ток генерационно-рекомбинационной составляющей (механизма Шокли-Рида-Холла). В связи с этим преимущество использования легированного акцепторной примесью барьера не является очевидным и требует детального обоснования.

Авторы работы [8] предложили принципиально новый подход к решению задачи устранения барьера для неосновных носителей заряда. На рис. 3 приведены рассчитанные авторами работы зонные диаграммы структур с барьерами в виде двух различных конфигураций сверхрешёток — (6 монослоёв HgTe / 28 монослоёв Cd_{0,95}Hg_{0,05}Te) и (5 монослоёв HgTe / 28 монослоёв Cd_{0,95}Hg_{0,05}Te).

Проведённое авторами работы моделирование позволяет заключить, что подобная структура барьера позволяет без введения областей пространственного заряда полностью устранить потенциальный барьер для дырок.

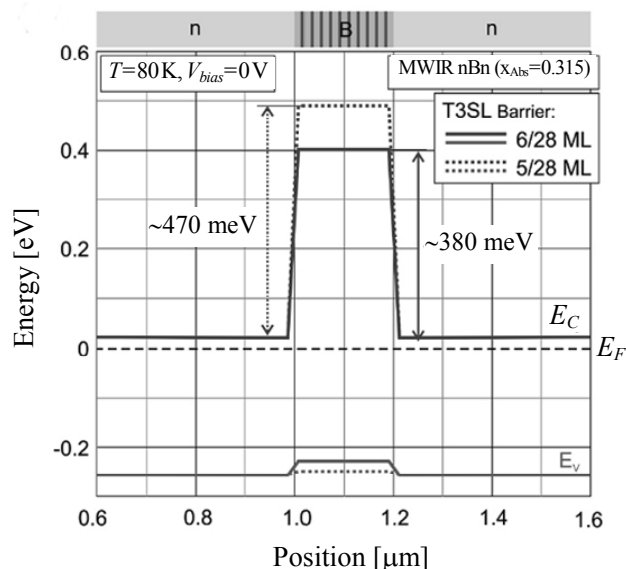


Рис. 3. Рассчитанные зонные диаграммы структур с барьерами в виде сверхрешётки III типа (T3SL) при температуре 80 К при нулевом внешнем смещении [8] для двух вариантов сверхрешёток.

Также существует ряд работ, в которых помимо описанных выше механизмов повышения эффективности работы фоточувствительной nBn -структуры проводится дополнительная оптимизация её конструктивных элементов. Например, в [3] авторы рассматривают различные конструкции контактного слоя и демонстрируют существенное влияние конфигурации контакта на вольт-амперные характеристики и чувствительность прибора.

Заключение

На основании приведённых выше результатов показано, что барьерные структуры типа nBn представляют собой альтернативу для создания фотодиодных приёмников излучения среднего и дальнего ИК-диапазонов за счёт имеющейся возможность 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 гетероструктуре *n*-типа, а именно, легирование акцепторными примесями (в том числе полную имплантацию) и последующий активационный отжиг.

В настоящий момент существует ещё ряд нерешённых конструктивных и технологических задач в вопросе создания подобных детекторов. Наличие барьера для дырок в валентной зоне в структурах nBn на основе материала КРТ требует ряда технологических решений, а именно: использование больших значений внешнего смещения, управление параметрами барьерного слоя, включая акцепторное легирование барьера, а также использование сложных многослойных барьеров.

Данное научное исследование (проект № 8.2.10.2015) выполнено при поддержке Программы «Научный фонд им. Д. И. Менделеева Томского государственного университета» в 2016 году.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ashley T. et al. // Electron. Lett. 1985. Vol. 21. P. 451.
2. Maimon S. et al. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 151109.
3. Kopytko M. et al. // Opto-Electronics Review. 2015. Vol. 23 (2). P. 143.
4. Ye Z. H. et al. // Proc. of SPIE. 2014. Vol. 9070. P. 90701L-1.
5. Martyniuk P. et al. // Bulletin of the polish academy of sciences. Technical sciences. 2013. Vol. 61. No. 1. P. 211.
6. Akhavan N.D. et al. // Journal of Electronic Materials. 2015. Vol. 44. No. 9. P. 3044.
7. Kopytko M. et al. // Infrared Physics & Technology. 2014. Vol. 64. P. 47.
8. Kopytko M. et al. // Journal of Electronic Materials. 2015. Vol. 44. No. 1. P. 158.

Analysis of the nBn -type structures for infrared photodiode application

A. V. Voitsekhovskii and D. I. Gorn

National Research Tomsk State University
36 Lenina av., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: vav43@mail.tsu.ru; gorn_dim@sibmail.com

Received June 8, 2016

Barrier CdHgTe-based nBn -type structures are analyzed in this paper. At present, such structures are considered as 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 follows: 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 a superlattices

PACS: 78.55.Et

Keywords: MCT, $Cd_xHg_{1-x}Te$, photodetector, barrier structure, nBn .

REFERENCES

1. T. Ashley et al., Electron. Lett. **21**, 451 (1985).
2. S. Maimon et al., Appl. Phys. Lett. **89**, 151109 (2006).
3. M. Kopytko et al., Opto-Electronics Review **23** (2), 143 (2015).
4. H. Ye Z. et al., Proc. of SPIE **9070**, 90701L-1 (2014).
5. P. Martyniuk et al., Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences **61** (1), 211 (2013).
6. N. D. Akhavan et al., Journal of Electronic Materials **44**, 3044 (2015).
7. M. Kopytko et al., Infrared Physics & Technology **64**, 47 (2014).
8. M. Kopytko et al., Journal of Electronic Materials **44**, 158 (2015).