УДК 537.9

УЗКОЗОННЫЕ ФОТОДЕТЕКТОРЫ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК InAsSbP

В.Г. АРУТЮНЯН^{*}, К.М. ГАМБАРЯН, В.М. АРУТЮНЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: harutyunyan@ysu.am

(Поступила в редакцию 11 ноября 2016 г.)

Представлены результаты исследований фотодетекторов среднего инфракрасного диапазона на основе квантовых точек (КТ) InAsSbP, выращенных на подложках InAs(100) методом модифицированной жидкофазной эпитаксии. Поверхностная концентрация выращенных КТ, измеренная с помощью атомносилового микроскопа, составляла (4–8) $\times 10^9$ см⁻². Для исследования морфологии и качества кристаллической структуры выращенных КТ был использован также сканирующий туннельный микроскоп. Фотодетекторы изготовлены в виде фотосопротивлений на основе подложки *n*-InAs(100) с КТ на ее поверхности. Обнаружено расширение спектра фотоотклика фотодетектора вплоть до 4 мкм. Оптические характеристики созданных структур были исследованы при облучении непрерывным Не–Ne лазером с длиной волны 1.15 мкм. Выявлено, что при комнатной температуре относительная поверхностная проводимость увеличивалась на 16% при плотности мощности лазерного излучения 0.15 Вт/см². Выявлен также гистерезис емкости с максимальной остаточной емкостью 2.17 нФ при частоте 10³ Гц.

1. Введение

Известно, что основными вызовами современной наноэлектроники и нанотехнологии является не только создание и управление свойствами различных типов наноструктур, но и их применение в реальных полупроводниковых приборах с улучшением их выходных характеристик. Что касается квантовых точек (КТ), то часто их называют искуственными атомами, т. к. в связи с пространственным ограничением носителей заряда (электроны и дырки в полупроводниках) их спектр квантуется и становится дискретным как в атомах [1]. Однако по сравнению с обычными атомами свойствами КТ можно управлять с помощью выбора их размера, геометрической формы, химического состава материала и т. д. В последнее десятилетие КТ были успешно применены в солнечных элементах, светоизлучающих приборах, фотодетекторах (ФД), для разработки квантовых компьютеров и т. д. В настоящее время все важные для практического применения ФД создаются на основе наноструктур. В частности, полупроводниковые структуры на основе квантовых ям (КЯ) и КТ имеют особое значение при создании следующего поколения фотодетекторов инфракрасного (ИК) излучения [2]. ИК ФД на основе КЯ для их применения в разных диапазонах длин волн, обычно, создаются на основе соединений A₃B₅ и их твердых растворов. Такие ФД имеют узкий спектр поглощения, которым можно управлять с помощью выбора ширины КЯ, химического состава материала и т. д.

Соединения A_3B_5 и их твердые растворы позволяют охватить довольно широкий спектр, соответствующий запрещенной зоне КЯ. В частности, сверхрешетки InAs/GaSb были использованы в современных фокальных ФД [2]. Были созданы и исследованы микроскопическая модель ФД с КЯ [3], многоканальные и широкополосные ИК ФД для приборов спектральной визуализации [4], портативные камеры визуализации в средней и длинноволновой области спектра [5] и т. д. Однако, несмотря на значительный прогресс в создании ФД на основе КЯ стало понятно, что ФД с КТ [6,7] имеют ряд преимуществ по сравнению с ФД на основе КЯ. В частности, они более чувствительны при перпендикулярном падении излучения, имеют более низкое значение темнового тока и работают при более высоких (вплоть до комнатной) температурах. В ФД с КТ увеличение времени жизни носителей заряда за счет уменьшения электрон-фононного рассеяния приводит к увеличению фоточувствительности и обнаружительной способности ФД.

Известно, что соединения InAs, InSb, InP и их твердые растворы являются весьма перспективными при создании ФД среднего ИК диапазона. Четырехкомпонентный твердый раствор InAsSbP был также успешно использован при вырацивании КТ. Впервые КТ данного состава были выращены на подложках GaAs [8] и был обнаружен пик фотолюминесценции на длине волны 1.65 мкм при температуре 4 К. КТ InAsSbP были также успешно выращены на подложках InAs [9– 14], но уже с пиком фоточувствительности в области 3–5 мкм среднего ИК диапазона.

В настоящей работе представлены результаты по созданию и исследованию ИК фотосопротивлений с КТ InAsSbP, выращенными из четырехкомпонентной In–As–Sb–Р жидкой фазы на поверхности подложки *n*-InAs(100). Исследована морфология КТ, измерен спектр фотоотклика и другие оптоэлектронные характеристики созданных ФД.

2. Методика эксперимента

Для выращивания КТ InAsSbP была использована модифицированная жидкофазная эпитаксия [9]. Процесс роста осуществлялся в горизонтальной графитовой ячейке в потоке очищенного через палладиевые фильтры водорода. При

формировании жидкой фазы в качестве растворителя использовался In (7N), а качестве растворенных в жидкой фазе источников мышьяка, фосфора и сурьмы – нелегированные кристаллы InAs, InP и Sb (6N), соответственно. Нелегированные подложки *n*-InAs, использованные в данной работе, имели диаметр 11 мм, ориентацию (100), фоновую концентрацию примесей 2×10^{16} см⁻³ и подвижность электронов 45000 см²B⁻¹c⁻¹ при 78 К. Рассогласование кристаллических решеток подложки и четырехкомпонентного смачивающего слоя было выбрано таким образом, чтобы зародышеобразование КТ осуществлялось в режиме Странски–Крастанова [15,16].

Для исследования морфологии и кристаллографических свойств КТ были использованы атомно-силовой микроскоп (ACM) и сканирующий туннельный микроскоп (CTM). ИК ФД были изготовлены в виде фотосопротивлений (ФС), учитывая все предъявляемые к таким структурам требования. Они состояли из подложки InAs и КТ, выращенных на ее поверхности (рис.1). Вольт–фарадные характеристики ФС были измерены при комнатной температуре высокопрецизионным LCR-метром QuadTech 1920. Изменение удельной поверхностной проводимости ИК ФС измерялось под действием излучения непрерывного He–Ne лазера на длине волны 1.15 мкм. Для исследования фоточувствительности созданных структур был также использован спектрометр ИКС-21.



Рис.1. Схематическое представление ИК ФД с КТ.

3. Результаты и их обсуждение

Для изучения структурных и статистических характеристик КТ были проведены измерения на ACM (рис.2а), которые показали, что средняя поверхностная плотность и высота КТ изменялись в пределах (4–8)×10⁹ см⁻² и 0.5–21 нм, соответственно. Исследования также показали, что диаметр КТ в среднем превосходит их высоту в три раза. Изображение единичной КТ, полученное с помощью СТМ представлено на рис.2b.

Спектр фотоотклика созданного ИК ФД был измерен при комнатной температуре при напряжении смещения до 6 мВ. Показано, что происходит



Рис.2. (а) АСМ-изображение (боковой вид) КТ InAsSbP, выращенных на подложке InAs(100) и (b) СТМ-изображение единичной КТ.

уширение спектра фотоотклика вплоть до 4 мкм при основном пике чувствительности на длине волны 3.48 мкм (рис.3). Основной пик соответствует ширине запрещенной зоны подложки InAs ($E_g = 0.355$ эВ) при комнатной температуре.



Рис.3. Спектры нормированного фотоотклика фотодетектора с КТ при комнатной температуре при разных напряжениях смещения: l - 6 MB, 2 - 2 MB, 3 - 1 MB.

Дополнительные пики, показанные на рис.3, соответствуют межуровневым энергетическим переходам КТ InAsSbP второго рода [17,18].

Зависимость относительного изменения поверхностной проводимости $(\Delta\sigma/\sigma_d)$ ФД с КТ от плотности мощности Не–Ne лазерного излучения на длине волны $\lambda = 1.15$ мкм, где $\Delta\sigma$ – изменение проводимости под воздействием излучением лазера, а σ_d – темновая проводимость, приведена на рис.4. При плотности мощности излучения в 0.15 Вт/см² относительное изменение поверхностной проводимости ИК ФС составляло 16%, что является неплохим результатом для ФС на основе узкозонных полупроводников, работающих при комнатной температуре.



Рис.4. Зависимость относительного изменения поверхностной проводимости ($\Delta\sigma/\sigma_d$) ФД с КТ от плотности мощности Не–Ne лазерного излучения на длине волны 1.15 мкм.

Далее были исследованы вольт-фарадные характеристики (C-V) ФД с КТ при комнатной температуре в частотном диапазоне 10^3-10^6 Гц. C-V характеристики фотодетектора с КТ при комнатной температуре на частотах 10^4 и 10^6 Гц представлены на рис.5. Стрелками указаны направления изменения напряжения при проведении измерений. Исследования показали, что при увеличении напряжения с последующим его уменьшением емкость структуры не остается той же, т. е. наблюдается гистерезис (рис.5). Данное явление объясняется нами остаточной поляризацией, возникающей в КТ второго рода, за счет пространственного разделения электронов и дырок. На рис.5 показана остаточная емкость ΔC , максимальное значение которой составляет 2.17 нФ при 10^3 Гц. На рис.6 представлена зависимость остаточной емкости $\Delta C \Phi \Lambda$ с КТ от частоты при комнатной температуре. В данном исследовании была замечена следующая интересная закономерность. При увеличении частоты до 10⁴ Гц остаточная емкость уменьшается, потом остается постоянной (слабо увеличивается) в пределах частот 10⁴–10⁵ Гц, далее опять уменьшается с увеличением частоты вплоть до 10⁶ Гц, становясь равной нулю при частоте 7 × 10⁵ Гц. После этой «критической» частоты гистерезис емкости становиться «отрицательным» и физическое поведение *C*–*V* характеристики изменяется на противоположное. Это



Рис.5. Вольт–фарадные характеристики ФД с КТ на разных частотах. Стрелками показаны направления изменения напряжения при проведении измерений.



Рис.6. Зависимость остаточной емкости $\Delta C \Phi \Box$ с КТ от частоты.

явление коррелирует также с результатом, представленным на рис.5, когда увеличение емкости при увеличении напряжения сменяется на ее уменьшение при переходе частоты от докритической к послекритической.

4. Заключение

Таким образом, в работе представлены результаты исследований ФД ИК диапазона на основе КТ InAsSbP, выращенных на подложках InAs (100) методом модифицированной жидкофазной эпитаксии. Поверхностная концентрация КТ составляла (4–8)×10⁹ см⁻². Выявлено расширение спектра фотоотклика ФС вплоть до 4 мкм. Показано, что при комнатной температуре относительная поверхностная проводимость ФС с КТ увеличивалась на 16% при плотности мощности лазерного излучения 0.15 Вт/см² на длине волны 1.15 мкм. Выявлен гистерезис емкости структуры с максимальной остаточной емкостью 2.17 нФ на частоте 10³ Гц.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке ГКН МОН Армении в рамках гранта № 15Т-2Ј137, гранта № YSSP-13-08 в рамках NFSAT, YFA и CRDF Global.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. M.A. Kastner. Physics Today, 46, 24 (1993).
- 2. R. Rehm, M. Walther, J. Schmitz, F. Rutz, J. Fleißner, R. Scheibner, J. Ziegler. Infrared Physics & Technology, 52, 344 (2009).
- 3. V.D. Jovanovic, P. Harrison, Z. Ikonic, D. Indjin. Infrared Physics & Technology, 47, 3 (2005).
- S.V. Bandara, S.D. Gunapala, J.K. Liu, S.B. Rafol, C.J. Hill, D.Z. Ting, J.M. Mumolo, T.Q. Trinh. Infrared Physics & Technology, 47, 15 (2005).
- S.D. Gunapala, S.V. Bandara, J.K. Liu, C.J. Hill, S.B. Rafol, J.M. Mumolo, J.T. Trinh, M.Z. Tidrow, P.D. LeVan. Infrared Physics & Technology, 47, 67 (2005).
- 6. V. Ryzhii. Semicond. Sci. Technol., 11, 759 (1996).
- 7. J. Phillips. J. Appl. Phys., 91, 4590 (2002).
- 8. A. Krier, Z. Labadi, A. Hammiche. J. Phys. D: Appl. Phys., 32, 2587 (1999).
- 9. K.M. Gambaryan, V.M. Aroutiounian, V.G. Harutyunyan, O. Marquardt, P.G. Soukiassian. Appl. Phys. Lett., 100, 033104 (2012).
- K.M. Gambaryan, V.M. Aroutiounian, V.G. Harutyunyan. Appl. Phys. Lett., 101, 093103 (2012).
- 11. K.M. Gambaryan, V.M. Aroutiounian, V.G. Harutyunyan. Infrared Physics & Technology, 54, 114 (2011).
- 12. K.M. Gambaryan, V.M. Aroutiounian, V.G. Harutyunyan. ISESCO J. Science and Technology, 7, 35 (2011).
- V. Harutyunyan, K. Gambaryan, V. Aroutiounian. J. Nanosci. and Nanotechnol., 13, 799 (2013).
- 14. В.М. Арутюнян, К.М. Гамбарян, В.Г. Арутюнян, П.Г. Сукиассиан, Т. Боек,

Я. Шмидтбауер, Р. Бансен, Изв. НАН Армении, Физика, 48, 55 (2013).

- 15. I. Stranski, L. Krastanow. Math.-Naturwiss., 146, 797 (1938).
- 16. A. Baskaran, P. Smerek. J. Appl. Phys., 111, 044321 (2012).
- 17. K.M. Gambaryan. Nanoscale Res. Lett., 5, 587 (2010).
- O. Marquardt, T. Hickel, J. Neugebauer, K.M. Gambaryan, V.M. Aroutiounian. J. Appl. Phys., 110, 043708 (2011).

InAsSbP ՔՎԱՆՏԱՅԻՆ ԿԵՏԵՐՈՎ ՆԵՂ ԳՈՏԻԱԿԱՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔ ՈՒՆԵՑՈՂ ՄԻՋԻՆ ԵՆԹԱԿԱՐՄԻՐ ՏԻՐՈՒՅԹԻ ՖՈՏՈԸՆԴՈՒՆԻՉՆԵՐ

Վ.Գ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Կ.Մ. ՂԱՄԲԱՐՅԱՆ, Վ.Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

Ներկայացված են ձևափոխված հեղուկային էպիտաքսիայի եղանակով InAs(100) տակդիրի վրա աձեցված InAsSbP քվանտային կետերի (ՔԿ) հիման վրա պատրաստված միջին ենթակարմիր տիրույթի ֆոտորնդունիչների ուսումնասիրությունների արդյունքները։ Ատոմաուժային մանրադիտակով կատարված ուսումնասիրությունները ցույց են տվել, որ \pounds Կ–երի մակերևութային կոնզենտրազիան (4–8)×10 9 սմ $^{-2}$ է։ Տեսածրող թունելային մանրադիտակով ուսումնասիրված են նաև աձեզված ՔԿ–երի մորֆոլոգիան և բլուեղական կառուցվածքի որակը։ ՔԿ–երով *ո*–InAs(100) տակդիրի հիման վրա պատրաստված են ավանդական ֆոտոդիմադրությունների տեսքով ֆոտորնդունիչներ։ Նկատված ŀ ֆոտորնդունիչի ֆոտոարձագանքի սպեկտրի ընդլալնում միչև 4 մկմ ալիքի երկարությունը։ Ստեղծված կառուցվածքների օպտիկական հատկությունները ուսումնասիրված են He-Ne յազերի 1.15 մկմ այիքի երկարությամբ Ճառագայթման դեպքում։ Ցույց է տրվել, որ սենյակային ջերմաստիձանում 0.15 Վ/սմ² հզորության խտության դեպքում ՔԿ-ով ֆոտորնդունիչի մակերևութային հարաբերական հաղորդականությունը մեծանում է 16%-ով։ 10³ Հգ հաձախության դեպքում դիտված է նաև 2.17 նՖ առավելագույն մնազորդային ունակությամբ հիստերեզիս։

NARROW BANDGAP MID-INFRARED PHOTODETECTORS BASED ON InAsSbP QUANTUM DOTS

V.G. HARUTYUNYAN, K.M. GAMBARYAN, V.M. AROUTIOUNIAN

The results of investigations of mid-infrared photodetectors based on InAsSbP quantum dots (QDs) grown on InAs(100) substrate by modified liquid phase epitaxy are presented. The atomic force microscope measurements have shown that the surface density of grown QDs is (4–8) $\times 10^9$ cm⁻². The morphology and crystalline quality of grown QDs are investigated by a scanning tunneling microscope. Photodetectors based on *n*-InAs(100) substrate with InAsSbP QDs on its surface were fabricated in the form of a photoconductor cell. The photoresponse spectrum extended up to 4 µm was observed. The optical properties of fabricated structures were investigated under He-Ne laser irradiation with wavelength of 1.15 µm. It was found that the relative surface conductance increases by 16% at power density of 0.15 W/cm². Capacitance hysteresis with maximal remnant capacitance of 2.17 nF at 10³ Hz was observed as well.