

Исследование дифференциального сопротивления МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ с приповерхностными варизонными слоями

А. В. Войцеховский, Н. А. Кульчицкий, С. Н. Несмелов, С. М. Дзядх,
В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, М. В. Якушев,
Г. Ю. Сидоров

Проведены исследования адмиттанса МДП-структур на основе $n(p)\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$), выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках Si и GaAs. Изучались возможности повышения значения произведения дифференциального сопротивления области пространственного заряда на площадь полевого электрода $R_{\text{опз}A}$ путем создания приповерхностных варизонных слоев с повышенным содержанием CdTe. Установлено, что создание варизонного слоя приводит к увеличению значения $R_{\text{опз}A}$ в 10–200 раз для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ за счет подавления процессов туннельной генерации через глубокие уровни и уменьшение тока Шокли-Рида. МДП-структуры на основе $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ без варизонного слоя, выращенные на GaAs-подложках, имеют значения $R_{\text{опз}A}$, превышающие в 10 и более раз значения аналогичного параметра для структур, выращенных на Si-подложках.

Ключевые слова: МДП-структуры, HgCdTe, молекулярно-лучевая эпитаксия, дифференциальное сопротивление, варизонный слой.

Ссылка: Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Несмелов С. Н., Дзядх С. М., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Якушев М. В., Сидоров Г. Ю. // Прикладная физика. 2019. № 2. С. 28.
Reference: A. V. Voitsekhovskii, N. A. Kulchitsky, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, M. V. Yakushev, and G. Yu. Sidorov, Prikl. Fiz., No. 2, 28 (2019).

Введение

Полупроводниковый твердый раствор теллурида кадмия и ртути ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, HgCdTe) широко применяется для создания чувствительных элементов инфракрасных фотоприемных устройств из-за своих уникаль-

ных фундаментальных свойств [1]. Этот материал является одним из основных кандидатов для использования в инфракрасных системах третьего поколения [2].

Ширина запрещенной зоны $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ зависит от содержания CdTe, что позволяет создать на основе данного материала детекторы

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

Кульчицкий Николай Александрович², гл. специалист, д.т.н.

Несмелов Сергей Николаевич¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Дзядх Станислав Михайлович¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Варавин Василий Семенович³, с.н.с., к.ф.-м.н.

Дворецкий Сергей Алексеевич^{1,3}, зав. отделом, к.ф.-м.н.

Михайлов Николай Николаевич³, с.н.с., к.ф.-м.н.

Якушев Максим Витальевич³, зав. лаб., д.ф.-м.н.

Сидоров Георгий Юрьевич³, зав. лаб., к.ф.-м.н.

¹ Национальный исследовательский

Томский государственный университет.

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

Тел. (3822) 41-27-72. E-mail: vav43@mail.tsu.ru

² АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

³ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.

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

E-mail: ifp@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 29 мая 2018 г.

© Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Несмелов С. Н., Дзядх С. М., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Якушев М. В., Сидоров Г. Ю., 2019

для различных спектральных областей, в т. ч. для спектральных диапазонов окон прозрачности атмосферы 3–5 и 8–12 мкм. Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) HgCdTe позволяет выращивать пленки с заданным распределением состава по толщине эпитаксиальной пленки, что используется для оптимизации характеристик инфракрасных детекторов. В ИФП СО РАН выращиваются структуры с приповерхностными варизонными слоями с повышенным содержанием CdTe, которые уменьшают влияние поверхностной рекомбинации на время жизни фотоносителей в объеме пленки HgCdTe [3].

В настоящее время наиболее распространены гибридные матричные фотодетекторы на основе *p-n*- или *n-p*-фотодиодов из HgCdTe. Одной из проблем при создании МДП-фотодиодов на основе *n*-HgCdTe, являются большие значения туннельных токов генерации неосновных носителей заряда в области пространственного заряда (ОПЗ). Чувствительность МДП-фотодиодов определяется значением произведения дифференциального сопротивления ОПЗ в режиме сильной инверсии на площадь полевого электрода $R_{опз}A$.

Целью данной работы является исследование возможности повышения дифференциального сопротивления ОПЗ путем создания приповерхностных варизонных слоев с повышенным содержанием CdTe, а также выбора типа альтернативной подложки и типа пассивирующего покрытия.

Экспериментальные результаты

Исследуемые МДП-структуры изготавливались на основе *n*-Hg_{1-x}Cd_xTe ($x = 0,22$), выращенного методом МЛЭ в ИФП СО РАН на подложках из Si(013) и GaAs(013). При выращивании гетероструктуры с обеих сторон рабочего слоя создавались варизонные слои с повышенным компонентным составом CdTe. При расчетах для аппроксимации распределения содержания CdTe (состава x) по координате z в приповерхностном слое использовалось следующее выражение [4]:

$$x(z) = x_0 + A_1 \times \exp\left(-\frac{z}{B_1}\right),$$

где x_0 – состав в рабочем слое, A_1 и B_1 – коэффициенты, которые определяют распределение состава в варизонном слое. Сумма A_1+x_0 определяет состав на поверхности полупроводника, а B_1 характеризует расстояние, на котором второе слагаемое в формуле при увеличении z уменьшается в e раз от значения A_1 .

До нанесения диэлектрических покрытий для исследуемых гетероструктур при помощи метода Холла при температуре 78 К были определены концентрации основных носителей, подвижности электронов и проводимости. Некоторые параметры исследованных гетероструктур приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Технологические параметры гетероструктур

№	Подложка	Диэлектрик	Толщина рабочего слоя, мкм	x_0	A_1	B_1 , мкм
1	GaAs	SiO ₂ /Si ₃ N ₄	8,4	0,220	0,268	0,171
2	GaAs	Al ₂ O ₃	8,4	0,220	0,268	0,171
3	GaAs	Al ₂ O ₃	7,9	0,227	0,213	0,159
4	GaAs	Al ₂ O ₃	7,9	0,227	–	–
5	Si	Al ₂ O ₃	6,3	0,218	0,256	0,155
6	Si	Al ₂ O ₃	6,3	0,218	–	–
7	Si	SiO ₂ /Si ₃ N ₄	5,8	0,221	0,236	0,133

Таблица 2

Электрические параметры гетероструктур

№	Концентрация основных носителей, см ⁻³	Подвижность основных носителей, см ² В ⁻¹ с ⁻¹	Время жизни, мкс	Проводимость, Ом ⁻¹ см ⁻¹
1, 2	$6,5 \times 10^{14}$	98000	2	10,7
3, 4	$3,4 \times 10^{14}$	69000	5,1–7,2	3,9
5, 6	$5,4 \times 10^{14}$	34000	–	3,1
7	$2,6 \times 10^{15}$	69000	0,05–0,07	30,5

Структуры № 1–4 были выращены на подложках из GaAs, а структуры № 5–7 – на подложках из Si. Для структур № 2–6 сверху эпитаксиальной пленки при помощи плазменного атомно-слоевого нанесения формировался диэлектрический слой Al_2O_3 [5, 6]. Для структур № 4 и 6 диэлектрик наносился после удаления приповерхностного слоя пленки толщиной около 1 мкм в результате травления в растворе Br_2-HBr . В структурах № 1 и 7 использовался низкотемпературный двухслойный диэлектрик SiO_2/Si_3N_4 [7].

Полевые электроды на поверхности диэлектрика создавались из индия, причем площадь электрода определялась для каждой

структуры при помощи оригинальной оптической методики. Измерения проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса наногетероструктур на базе криостата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A.

На рис. 1 приведены зависимости произведения $R_{опз}A$ от обратной температуры, измеренные в режиме сильной инверсии, для МДП-структур на основе варизонного МЛЭ $n-Hg_{0,78}Cd_{0,22}Te$, выращенного на различных подложках и с разными диэлектриками. На рис. 2 показаны $R_{опз}A$ ($1000/T$) зависимости для структур с варизонным слоем и без варизонного слоя.

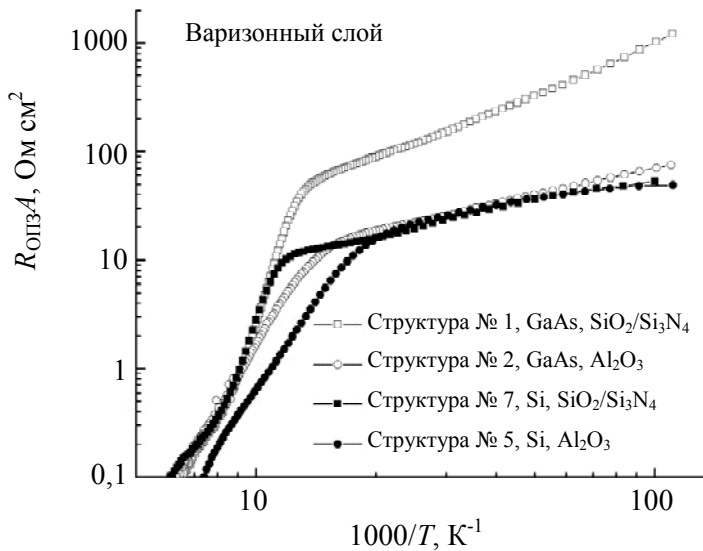


Рис. 1. Зависимости $R_{опз}A$ от обратной температуры для структур с варизонными слоями, выращенных на подложках из GaAs и Si, с диэлектриками SiO_2/Si_3N_4 и Al_2O_3 .

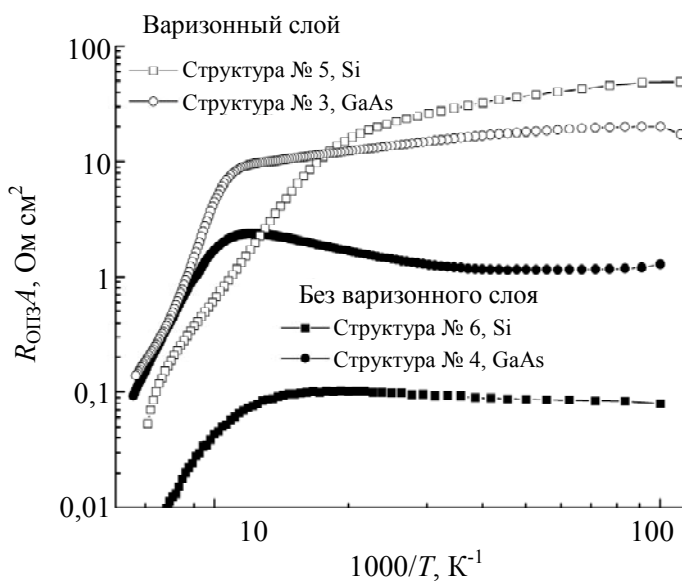


Рис. 2. Зависимости $R_{опз}A$ от обратной температуры для структур с варизонными слоями и без таких слоев, выращенных на подложках из GaAs и Si, с диэлектриком Al_2O_3 .

Из рис. 1 видно, что наибольшие значения произведения $R_{опз}A$ реализуются для

структуры № 1 с диэлектриком SiO_2/Si_3N_4 и подложкой из GaAs(013). Сравнивая кривые

для структур № 1 и № 2, изготовленных из одной гетероэпитаксиальной пленки, но с разными диэлектриками, видно, что для структур, выращенных на подложке из GaAs (013) с диэлектриком Al_2O_3 , характерны более низкие значения произведения $R_{\text{ОПЗ}A}$ (меньше в 5–10 раз). Для структур № 7 и № 5 такой зависимости произведения $R_{\text{ОПЗ}A}$ от типа диэлектрического покрытия не наблюдалось. Из рис. 1 также видно, что произведение $R_{\text{ОПЗ}A}$ больше для структуры, выращенной на подложке из GaAs, в случае пассивации диэлектриком $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ (структуры № 1 и № 7). При пассивации поверхности диэлектриком Al_2O_3 произведения $R_{\text{ОПЗ}A}$ принимают близкие значения независимо от типа подложки (структуры № 2 и № 5). Для всех структур в области низких температур характерно слабое уменьшение произведения $R_{\text{ОПЗ}A}$ при нагреве, но если для структур № 1 и № 2 (GaAs подложка) более крутой спад начинается при температуре около 90 К, то для структур № 7 и № 5 более крутой спад начинается при температуре около 50 К. Механизмы ограничения значений $R_{\text{ОПЗ}A}$ для разных типов подложек обсуждены в [8], спад в структурах на основе HgCdTe, выращенных на Si-подложках, связан с доминированием генерационных процессов Шокли–Рида в ОПЗ.

Из рис. 2 видно, что произведение $R_{\text{ОПЗ}A}$ для структуры № 4 без варизонного слоя с GaAs подложкой более чем на порядок превышает аналогичное произведение для структуры № 6, выращенной на подложке из Si. Для структур без варизонного слоя характерен небольшой спад произведения $R_{\text{ОПЗ}A}$ или постоянное значение этого произведения от (80–90) К при охлаждении структур. Создание приповерхностного варизонного слоя с повышенным содержанием CdTe приводит к увеличению произведения $R_{\text{ОПЗ}A}$ примерно в 10 раз для структур № 3 и № 4, выращенных на подложках из GaAs, и более чем в 200 раз для структур № 5 и № 6, выращенных на подложках из Si.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что создание варизонного слоя при-

водит к увеличению значения $R_{\text{ОПЗ}A}$ в 10–200 раз для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ за счет подавления процессов туннельной генерации через глубокие уровни и уменьшение тока Шокли–Рида.

МДП-структуры на основе $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ без варизонного слоя, выращенные на GaAs подложках, имеют значения $R_{\text{ОПЗ}A}$, превышающие в 10 и более раз значения аналогичного параметра для структур, выращенных на Si подложках. Это связано с высокой дефектностью пленок, выращенных на кремниевых подложках.

МДП-структуры на основе $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ с варизонным слоем, выращенные на GaAs подложках, имеют значения $R_{\text{ОПЗ}A}$ большие в 5–10 раз при использовании в качестве диэлектрика $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$. Значения $R_{\text{ОПЗ}A}$ для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ с варизонным слоем, выращенного на Si подложках, слабо зависят от типа диэлектрика, но эти значения оказались малыми при температуре 77 К.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 16-42-700759.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalski A. Infrared Detectors – New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011.
2. Kinch M. A. // Journal of Electronic Materials. 2015. Vol. 44. No. 9. P. 2969.
3. Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Варавин В. С., Михайлов Н. Н., Якушев М. В., Сабина И. В. // ФТП. 2001. Т. 35. № 9. С. 1092.
4. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2017. Vol. 102. P. 42.
5. Fu R., Pattison J. // Optical Engineering. 2012. Vol. 51. No. 10. P. 104003-(1-4).
6. Zhang P., Ye Z.-H., Sun C.-H., et al. // Journal of Electronic Materials. 2016. Vol. 45. No. 9. P. 4716.
7. Васильев В. В., Войцеховский А. В., Дульцев Ф. Н. и др. // Прикладная физика. 2007. № 5. С. 63.
8. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. et al. // Infrared Physics & Technology. 2017. Vol. 87. P. 129.

Investigation of the differential resistance of MIS-structures based on $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ with near-surface graded-gap layers

A. V. Voitsekhovskii¹, N. A. Kulchitsky², S. N. Nesmelov¹, S. M. Dzyadukh¹, V. S. Varavin³, S. A. Dvoretzky^{1,3}, N. N. Mikhailov³, M. V. Yakushev³, and G. Yu. Sidorov³

¹ National Research Tomsk State University
36 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: vav43@mail.tsu.ru

² Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

³ Rzhzanov Institute of Semiconductor Physics of SB RAS
13 Lavrentieva av., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: ifp@isp.nsc.ru

Received May 29, 2018

It has been established that the creation of a graded-gap layer leads to an increase in the value of product R_{SCRA} by 10–200 times for MIS structures based on $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ due to the suppression of tunneling through deep levels and a decrease in the Shockley-Read generation current. MIS structures based on $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ without a graded-gap layer grown on GaAs substrates have values of R_{SCRA} that exceed values of a similar parameter by 10 or more times for structures grown on Si substrates. This is due to the high defectiveness of films grown on silicon substrates. MIS structures based on MBE $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ with a graded-gap layer grown on GaAs substrates have values of R_{SCRA} large by a factor of 5–10 with $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ as an insulator. The values of R_{SCRA} for MIS structures based on $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ with a graded-gap layer grown on Si substrates depend weakly on the type of insulator, but these values turned out to be small at 77 K.

Keywords: MIS structures, HgCdTe, molecular-beam epitaxy, differential resistance, graded-gap layers.

REFERENCES

1. A. Rogalski, *Infrared Detectors* (New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011).
2. M. A. Kinch, *Journal of Electronic Materials* **44**, 2969 (2015).
3. Yu. G. Sidorov, S. A. Dvoretzky, V. S. Varavin, et al., *Semiconductors* **35**, 1045 (2001).
4. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* **102**, 42 (2017).
5. R. Fu and J. Pattison, *Optical Engineering* **51** (10), 104003 (2012).
6. P. Zhang, Z.-H. Ye, C.-H. Sun, et al., *Journal of Electronic Materials* **45** (9), 4716 (2016).
7. V. V. Vasilyev, A. V. Voitsekhovskii, F. N. Dultsev, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 5, 63 (2007).
8. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Infrared Physics & Technology* **87**, 129 (2017).