

УДК 621.315.592

*А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ**, *Д.В. ГРИГОРЬЕВ**, *А.Г. КОРОТАЕВ**, *И.В. РОМАНОВ**,
*В.Ф. ТАРАСЕНКО***, *М.А. ШУЛЕПОВ***

ВЛИЯНИЕ ДИФфуЗИОННОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЗКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ CdHgTe

Исследуется влияние объемного разряда наносекундной длительности, формирующегося в неоднородном электрическом поле при атмосферном давлении на образцы эпитаксиальных пленок CdHgTe (КРТ) *p*-типа проводимости. Измерение электрофизических параметров образцов КРТ после облучения показало, что в приповерхностном слое эпитаксиальных пленок образуется слой, проявляющий *n*-тип проводимости. При 600 и более импульсах воздействия толщина и параметры образующегося *n*-слоя таковы, что измеряемая полевая зависимость коэффициента Холла соответствует материалу *n*-типа проводимости. Полученные результаты показывают перспективность применения объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления для модификации приповерхностных свойств эпитаксиальных пленок КРТ.

Keywords: *CdHgTe, электрофизические параметры, объемный диффузионный разряд.*

Введение

Тройные полупроводниковые соединения $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ), где состав материала *x* – мольное содержание Cd, являются одним из основных материалов для создания собственных фотоприемников ИК на диапазон длин волн 3–5 и 8–14 мкм [1]. В настоящее время гетероэпитаксиальные пленки КРТ, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), наиболее перспективный материал для создания многоэлементных фотоприемных устройств инфракрасного излучения, обеспечивающих обработку сигнала непосредственно в фокальной области. Наряду с исследованием исходных свойств эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом МЛЭ, актуальной является задача контролируемого изменения параметров материала с целью получения заданных полупроводниковых структур.

Разряды различных типов и электронные пучки широко используются для модификации приповерхностных слоев различных материалов [2]. В работе [3] была показана возможность формирования в неоднородном электрическом поле объемного разряда при атмосферном давлении. В воздухе атмосферного давления и неоднородном электрическом поле объемный разряд формируется при обеих полярностях импульса напряжения на электроде с малым радиусом кривизны [4]. При воздействии подобного разряда возможна реализация высоких удельных мощностей энерговклада (до 800 МВт/см³ [5]). При этом из разрядной плазмы генерируются пучки убегающих электронов с амплитудой тока за фольгой в десятки-сотни ампер, а длительность импульса тока пучка на полувысоте не превышает 100 пс [6]. Таким образом, особенностью подобных разрядов является комплексное воздействие плазмы плотного наносекундного разряда с удельной мощностью энерговклада в сотни мегаватт на кубический сантиметр, сверхкороткого электронного пучка с широким энергетическим спектром и оптического излучения различных спектральных диапазонов из плазмы разряда.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления на электрофизические свойства эпитаксиального материала КРТ, выращенного методом МЛЭ.

Образцы и методика эксперимента

Для проведения исследований была подготовлена серия образцов эпитаксиальных пленок КРТ *p*-типа проводимости ($p = (1-2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\mu_p = 300-500 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии в ИФП СО РАН г. Новосибирска. Состав рабочего слоя эпитаксиальных пленок составлял $x = 0.22$. Подготовленные образцы размещались в газовом диоде на медном аноде. Расстояние между плоским анодом из медной фольги и трубчатым катодом равнялось 8–16 мм. В качестве источника импульсного напряжения использовался генератор РАДАН-220, формировавший импульсы напряжения с амплитудой ~ 230 кВ (напряжение холостого хода), дли-

тельностью импульса на полувысоте ~ 2 нс (на согласованной нагрузке) и временем нарастания ~ 0.5 нс. Регистрация тока разряда осуществлялась с помощью токового шунта из чип-резисторов, установленного между анодом и корпусом разрядной камеры. Измерения показали, что амплитуда тока разряда при обеих полярностях импульса напряжения составляла ~ 3 кА, а полная длительность импульса тока разряда ~ 30 нс (длительность первого полупериода тока разряда ~ 8 нс).

Облучение образцов проводилось в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов 1 Гц. Воздействие проводилось в диапазоне 100–1200 импульсов. Электрофизические параметры образцов КРТ до и после воздействия разряда определялись из измерений эффекта Холла методом Ван дер Пау. Измерения проводились при постоянном токе, протекающем через образец ($I = 1$ мА), для двух направлений тока и двух направлений постоянного магнитного поля. Удаление тонких слоев с поверхности облученного материала проводилось в 0.2 %-м растворе брома в деметилформамиде. Поверхность облученных образцов исследовалась с помощью атомно-силового микроскопа (AFM) «Ntegra Prima» (пр-во NT-MDT) и оптического профилометра MicroXAM-100 при комнатных условиях.

Результаты и их обсуждение

Анализ результатов измерения электрофизических параметров облученных образцов эпитаксиальных пленок КРТ показал, что после облучения в диапазоне 100–1200 импульсов для всех образцов наблюдается увеличение проводимости. Причем для образцов, облученных в диапазоне импульсов от 100 до 400, наблюдается уменьшение значения коэффициента Холла (рис. 1). При этом на полевой зависимости коэффициента Холла наблюдается сдвиг точки инверсии знака коэффициента Холла в область более высоких магнитных полей со значения 0.17 Тл до значения 0.28 Тл. Увеличение числа импульсов воздействия объемного разряда до значения 600 импульсов приводит к инверсии знака коэффициента Холла (рис. 2, кривая 2). Дальнейшее увеличение числа импульсов воздействия приводит к уменьшению значения коэффициента Холла (рис. 2, кривые 2, 3, 4), при этом образцы эпитаксиальных пленок КРТ характеризуются низкими значениями подвижности электронов $\sim (2-3) \cdot 10^3 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, что на два порядка ниже значений, соответствующих эпитаксиальному материалу n -типа проводимости высокого качества. Полученные результаты, позволили выдвинуть предположение, что в процессе воздействия на образцы эпитаксиальных пленок объемного разряда на поверхности или в приповерхностной области материала происходит образование слоя с высокой концентрацией электронов, проводимость которого такова, что он шунтирует основной объем эпитаксиальной пленки при проведении измерений эффекта Холла.

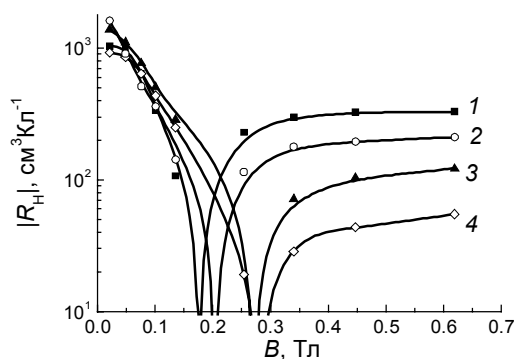


Рис. 1. Полевая зависимость коэффициента Холла для образцов эпитаксиальной пленки CdHgTe до (кр. 1) и после воздействия объемного разряда. Количество импульсов воздействия: (кр. 2) – 100, (кр. 3) – 200, (кр. 4) – 400

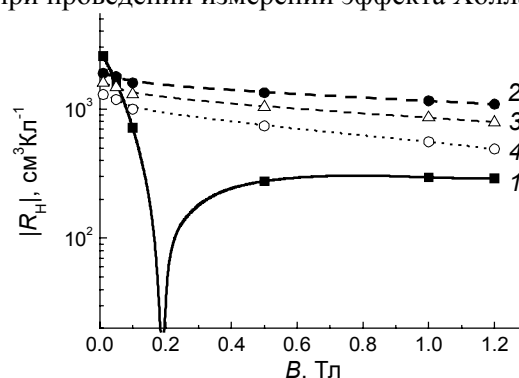


Рис. 2. Полевая зависимость коэффициента Холла для образцов эпитаксиальной пленки CdHgTe до (кр. 1) и после воздействия объемного разряда. Количество импульсов воздействия: (кр. 2) – 600, (кр. 3) – 800, (кр. 4) – 1000

Исследование структуры поверхности исходных и облученных эпитаксиальных пленок на атомно-силовом микроскопе показало, что качество поверхности образцов после воздействия объемного разряда не изменяется. Неровность поверхности слабо увеличивается от 1.6 до 2.2 нм. Кроме того, было проведено исследование профиля распределения поверхности образца, часть поверхности которого при облучении была закрыта диэлектрической пластинкой. Измерения про-

филя поверхности проводилось на оптическом профилометре MicroXAM-100. Анализ результатов измерения показал, что на границе раздела облученный/необлученный образец отсутствует характерная ступень, что позволяет сделать заключение об отсутствии на поверхности облученной части исследуемого образца инородной пленки (рис. 3).

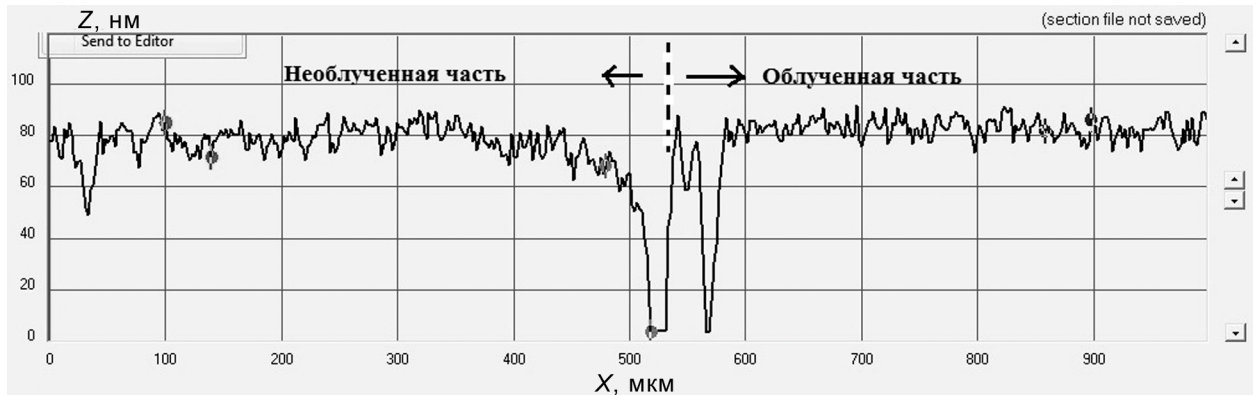


Рис. 3. Профиль поверхности образца КРТ, часть поверхности которого при облучении была закрыта диэлектрической пластинкой

При стравливании с поверхности облученного материала 0.1 мкм электрофизические параметры образцов, подвергнутых облучению, возвращались к исходным значениям (рис. 4, кривая 3). Полученные результаты, позволили сделать заключение, что в процессе воздействия на образцы эпитаксиальных пленок объемного разряда слой высокой проводимости образуется в приповерхностной области материала.

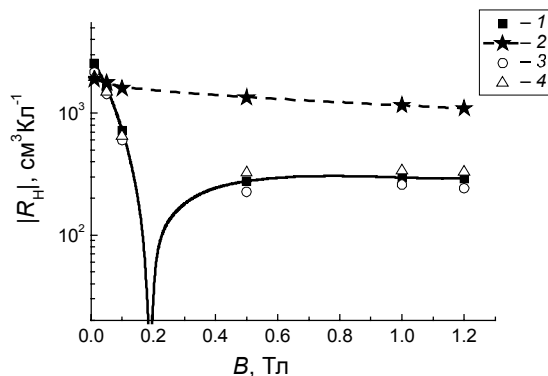


Рис. 4. Полевая зависимость коэффициента Холла для образцов эпитаксиальной пленки CdHgTe: кр. 1 – до воздействия; кр. 2 – 600 импульсов объемного разряда; после травления облученного образца в растворе брома в демитилформамиде (кр. 3) и соляной кислоте (кр. 4)

Кроме того, обнаружено, что после обработки облученных образцов в растворе концентрированной соляной кислоты также происходит восстановление исходных значений электрофизических параметров материала (рис. 4, кривая 4).

Однако соляная кислота не вступает в химическую реакцию ни с исходным КРТ, ни с материалом, подвергнутым какой-либо радиационной обработке. В газовом диоде при объёмном наносекундном разряде в атмосфере воздуха после подачи короткого импульса напряжения в разрядном промежутке формируется плазма, состоящая из электронного пучка, положительно и отрицательно заряженных ионов, через диод протекает электрический ток.

При этом на образец эпитаксиальной пленки

КРТ, расположенный на аноде, производится комплексное воздействие, состоящее из пучка электронов и отрицательных ионов, которые, воздействуя на поверхность образца, могут вызвать образование различных химических соединений КРТ. Полученные нами данные позволяют сделать заключение о том, что в приповерхностной области облученного материала происходит образование химических соединений КРТ с атомами кислорода и азота, наподобие анодного оксида, который растворяется в соляной кислоте. Анализ литературных данных показывает, что подобные химические соединения содержат значительную концентрацию положительно заряженных центров, наличие которых приводит к образованию инверсионного слоя на границе раздела с эпитаксиальной пленкой КРТ *p*-типа проводимости. Образование подобного инверсионного слоя показано при исследовании свойств границы раздела оксидная пленка – КРТ [7]. Моделирование данного предположения было проведено путем выращивания на поверхности эпитаксиальной пленки КРТ-оксида методом анодного окисления. После выращивания анодного оксида было проведено измерение электрофизических параметров полученной многослойной структуры. Результаты измере-

ний показали, что наблюдаемые изменения полевой зависимости коэффициента Холла до и после нанесения анодного окисла аналогичны наблюдаемым результатам при облучении образцов КРТ объемным разрядом (рис. 5).

Заключение

Таким образом, полученные экспериментальные данные показывают, что при воздействии импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления на эпитаксиальные пленки КРТ в приповерхностном слое материала происходит образование химических соединений КРТ с атомами кислорода и азота. Образовавшийся слой характеризуется наличием встроенного положительного заряда, который приводит к образованию инверсионного слоя на границе раздела оксид – КРТ, который «шунтирует» остальную часть образца таким образом, что измеряемая полевая зависимость коэффициента Холла соответствует материалу n-типа проводимости.

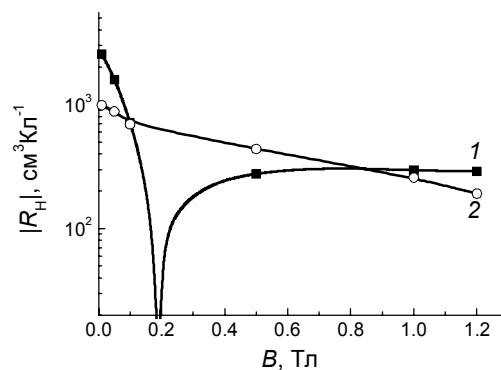


Рис. 5. Полевая зависимость коэффициента Холла для образцов эпитаксиальной пленки CdHgTe до (кр. 1) и после (кр. 2) выращивания на поверхности анодного окисла

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rogalski A. // Opto-electronics Review. – 2012. – V. 20. – P. 279–308.
2. Shulepov M.A., Tarasenko V.F., Goncharenko I.M., et al. // Technical Physics Letters. – 2008. – V. 34. – Iss. 4. – P. 296–299.
3. Tarasova L.V. and Khudyakova L.N. // Sov. Phys. Tech. Phys. – 1969. – V. 14. – P. 1148.
4. Kostyrya I.D., Orlovskii V.M., Tarasenko V.F., et al. // Technical Physics Letters. – 2005. – V. 31. – Iss. 6. – P. 457–460.
5. Alekseev S.B., Gubanov V.P., Kostyrya I.D., et al. // Quantum Electron. – 2004. – V. 34. – P. 1007–1010.
6. Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., and Kostyrya I.D. // Laser Part. Beams. – 2005. – V. 23. – P. 545–551.
7. Brogowski P. and Piotrowski J. // Semicond. Sci. Technol. – 1990. – V. 5. – P. 530–533.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 01.10.14.

**Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия
E-mail: 745-denn@elefot.tsu.ru

Войцеховский Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой;
Григорьев Денис Валерьевич, к.ф.-м.н., доцент;
Коротаев Александр Григорьевич, к.ф.-м.н., доцент;
Романов Илья Владимирович, к.ф.-м.н., мл. науч. сотр.;
Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией;
Шулепов Михаил Александрович, к.ф.-м.н., мл. науч. сотр.

A.V. VOITSEKHOVSKII, D.V. GRIGORYEV, A.G. KOROTAEV, I.V. ROMANOV, V.F. TARASENKO, M.A. SHULEPOV

THE INFLUENCE OF A DIFFUSION DISCHARGE IN THE AIR AT ATMOSPHERIC PRESSURE ON THE ELECTRO-PHYSICAL PROPERTIES OF NARROW-GAP SEMICONDUCTORS CdHgTe

The effect of a nanosecond volume discharge forming in an inhomogeneous electrical field in various gas environments at atmospheric pressure on the CdHgTe(MCT) epitaxial films of the p-type conduction is studied. The measurement of the electrophysical parameters of the MCT specimens upon irradiation shows that a layer exhibiting the n-type conduction is formed in the near-surface region of the epitaxial films. Analysis of the preliminary results reveals that the foregoing nanosecond volume discharge in various gas environments at atmospheric pressure is promising for modification of electro-physical MCT properties.

Keywords: CdHgTe, electrophysical parameters, nanosecond volume discharge.

REFERENCES

1. Rogalski A. (2012). History of infrared detectors. *Opto-electronics Review*, 20, 279–308.
2. Shulepov M.A., Tarasenko V.F., Goncharenko I.M., et al. (2008). Modification of the near-surface layers of a copper foil under the action of a volume gas discharge in air at atmospheric pressure. *Technical Physics Letters*, 34(4), 296–299.
3. Tarasova L.V., Khudyakova L.N. (1969). *Sov. Phys. Tech. Phys.*, 14, 1148.
4. Kostyrya I.D., Orlovskii V.M., Tarasenko V.F., et al. (2005). Atmospheric pressure volume discharge without external preionization. *Technical Physics Letters*, 31(6), 457–460.
5. Alekseev S.B., Gubanov V.P., Kostyrya I.D., et al. (2004). Pulsed volume discharge in a nonuniform electric field at a high pressure and the short leading edge of a voltage pulse. *Quantum Electronics*, 34, 1007–1010.
6. Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D. (2005). Supershort electron beam from air filled diode at atmospheric pressure. *Laser Part. Beams*, 23, 545–551.
7. Brogowski P., Piotrowski J. (1990). The p-to-n conversion of HgCdTe, HgZnTe and HgMnTe by anodic oxidation subsequent heat treatment. *Semicond. Sci. Technol.*, 5(6), 530–533.