

УДК 621.315.592

Влияние объемного наносекундного разряда в атмосфере воздуха, аргона и азота на электрофизические свойства узкозонных твердых растворов CdHgTe

А.В. Войцеховский, Д.В. Григорьев, А.Г. Коротаев, А.П. Коханенко,
А.С. Петерс, В.Ф. Тарасенко, М.А. Шулепов

В работе представлены результаты исследований влияния объемного разряда наносекундной длительности, формирующегося в неоднородном электрическом поле при атмосферном давлении в атмосфере аргона, азота и воздуха на свойства эпитаксиальных пленок КРТ р-типа проводимости. Измерение электрофизических параметров образцов КРТ после воздействия объемного заряда показало, что в приповерхностном слое эпитаксиальных пленок образуется слой, проявляющий n-тип проводимости. Также отмечается изменение электрофизических свойств материала со временем.

PACS: 73.40Qv, 73.21As, 85.60Gz, 73.61Ga.

Ключевые слова: теллурид кадмия ртути, объемный разряд атмосферного давления, эпитаксиальные слои, электрофизические параметры.

Введение

Тройные полупроводниковые соединения CdHgTe (КРТ) в настоящее время являются одним из основных материалов для создания собственных ИК-фотоприемников на диапазоны длин волн 3–5 и 8–14 мкм [1]. Основные тенденции развития современной технологии направлены на разработку высокоэффективных многоэлементных фотоприемных устройств на основе эпитаксиального материала КРТ. Наряду с разработкой способов управления исходными свойствами эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), актуальной является задача контролируемого изменения параметров материала внешними воздействиями с целью получения заданных свойств полупроводниковых структур.

Войцеховский Александр Васильевич, профессор.

Коханенко Андрей Павлович, профессор.

Григорьев Денис Валерьевич, доцент.

Коротаев Александр Григорьевич, доцент.

Петерс Александр Сергеевич, студент.

Томский государственный университет.

Россия, 634045, Томск, пр. Ленина, 36.

Тел.: (3822) 412772.

E-mail: vav@elefot.tsu.ru; kokh@elefot.tsu.ru

Тарасенко Виктор Федотович, зав. лабораторией.

Шулепов Михаил Александрович, м.н.с.

Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3.

Тел.: (3822) 491685. E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Статья поступила в редакцию 20 марта 2013 г.

© Войцеховский А.В., Коханенко А.П., Григорьев Д.В., Коротаев А.Г., Петерс А.С., Тарасенко В.Ф., Шулепов М.А., 2013

В настоящее время разряды различных типов и электронные пучки широко используются для модификации приповерхностных слоев различных материалов [2]. В частности, в работе [3] была показана возможность формирования в неоднородном электрическом поле объемного разряда при атмосферном давлении. Особенностью разряда в неоднородном электрическом поле является возможность реализации высоких удельных мощностей энергоклада (до 800 МВт/см³ [4]). 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 [5]. Таким образом, при формировании наносекундного объемного разряда в воздухе на анод оказывается комплексное воздействие как плазмы плотного наносекундного разряда с удельной мощностью энергоклада в сотни мегаватт на кубический сантиметр, так и сверхкороткого импульсного электронного пучка с широким энергетическим спектром.

Цель настоящей работы – исследование влияния объемного наносекундного разряда в воздухе, аргоне и азоте атмосферного давления на электрофизические свойства эпитаксиального материала CdHgTe, выращенного методом МЛЭ.

Образцы и методика эксперимента

Для проведения исследований были подготовлены 2 серии образцов варизонных эпитаксиальных пленок КРТ р-типа проводимости,

выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии в ИФП СО РАН (г. Новосибирск). Толщина эпитаксиальных пленок составляла 9,7 мкм, состав материала рабочего слоя $x = 0,22$. Состав материала в приповерхностном варизонном слое непрерывно изменяется от величины, соответствующей значению рабочего слоя, до значения $x = 0,4$ на поверхности эпитаксиальной пленки. Электрофизические параметры образцов КРТ до и после воздействия объемного разряда определялись из измерений эффекта Холла методом Ван дер Пау. Измерения проводились при постоянном токе, протекающем через образец ($I = 1$ мА), причем для двух направлений тока и двух направлений постоянного магнитного поля ($B = 0 \div 0,67$ Тл). Измерения исходных электрофизических параметров образцов эпитаксиальных пленок показали, что концентрация дырок составляла $(1,1 \div 2) \cdot 10^{16}$ см⁻³, а подвижность дырок $500 \div 600$ см²В⁻¹с⁻¹ (см. табл. 1).

Подготовленные образцы размещались в газовом диоде на медном аноде. Расстояние между плоским медным анодом и трубчатым катодом составляло 8 ÷ 11 мм. В качестве источника импульсного напряжения использовался генератор РАДАН-220, формировавший импульсы напряжения с амплитудой ~230 кВ (напряжение холостого хода), длительностью импульса на полувывоте ~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 для серии образцов, облученных в воздухе, и 600, 1200 импульсов при облучении в атмосфере аргона и азота, соответственно.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Визуальный осмотр и исследование структуры поверхности исходных и облученных эпитаксиальных пленок показали, что качество поверхности образцов после воздействия объемного разряда не изменяется, т.е. изменение структуры поверхности облученных образцов не происходит.

Анализ результатов измерения электрофизических параметров образцов эпитаксиальных пленок КРТ серии 706, подвергнутых воздействию в атмосфере воздуха, показал, что после облучения в диапазоне 100 ÷ 1200 импульсов для всех образцов наблюдается увеличение проводимости. Причем для образцов, облученных в атмосфере воздуха в диапазоне импульсов от 100 до 400, наблюдается уменьшение значения коэффициента Холла в области насыщения полевой зависимости $R_H(B)$. При этом на полевой зависимости коэффициента Холла наблюдается сдвиг точки инверсии знака коэффициента Холла в область более высоких магнитных полей от значения 0,17 Тл до значения 0,28 Тл (рис. 1). Увеличение числа импульсов воздействия объемного разряда до значения 600 импульсов приводит к инверсии знака коэффициента Холла в диапазоне более 0,2 Тл (рис. 2). Дальнейшее увеличение числа

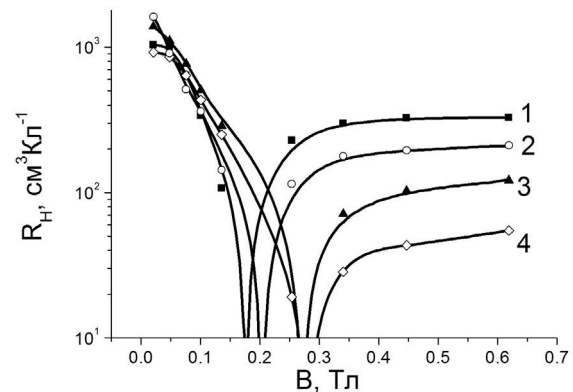


Рис. 1. Полевая зависимость коэффициента Холла эпитаксиальных пленок КРТ после воздействия импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления.

Количество импульсов для кривой 1 – 0, 2 – 100, 3 – 200, 4 – 400.

Таблица 1

Исходные электрофизические параметры образцов КРТ

Серия	Толщина d , мкм	Концентрация носителей p , см ⁻³	Подвижность носителей μ	Интегральная проводимость σ
706	9,7	$2 \cdot 10^{16}$	500	$1,6 \cdot 10^{-3}$
714	9,7	$1,9 \cdot 10^{15}$	600	$1,8 \cdot 10^{-4}$

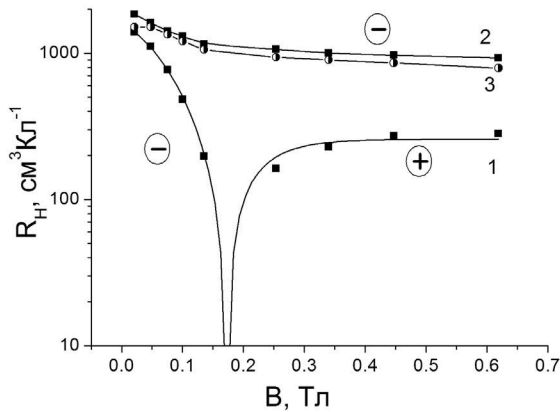


Рис. 2. Полевая зависимость коэффициента Холла эпитаксиальных пленок КРТ до (кривая 1), после (2) и через 3 месяца (3) после воздействия 600 импульсов объемного разряда в воздухе. А

импульсов воздействия приводит к уменьшению значения коэффициента Холла.

Было выдвинуто предположение о том, что на поверхности или в приповерхностной области пленки образуется высокопроводящий слой, параметры которого таковы, что измеряемая полевая зависимость коэффициента Холла соответствует n-типу проводимости. Численное моделирование электрофизических параметров, образующегося при воздействии объемного разряда слоя, на основе двухслойной модели Петрица позволило оценить интегральное значение его проводимости, приведенное в табл. 2.

Величина интегральной проводимости составляет $\sim 9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}$, т.е. в шесть раз превышает значение интегральной проводимости необлученной эпитаксиальной пленки. Кроме того, отмечено, что с увеличением числа импульсов воздействия значение интегральной проводимости образующегося слоя существенно не изменяется. Мониторинг изменения электрофизических параметров со временем показал, что отсутствует существенная релаксация электрофизических параметров образцов в течение 3 месяцев после воздействия (рис. 2).

Облучение образцов серии 706 в атмосфере аргона и азота показало, что наблюдается изменение полевой зависимости коэффициента Холла аналогично случаю облучения в воздухе. Так, для образца, облученного при 600 импульсах в атмосфере аргона, после облучения на полевой зависимости коэффициента Холла обнаружено изменение знака коэффициента Холла в области значений магнитной индукции более 0,2 Тл (рис. 3). Полевая зависимость данного образца при этом соответствует полевой зависимости для материала n-типа проводимости. Аналогично случаю облучения в атмосфере воздуха было выдвинуто предположение о том, что в результате воздействия объемного разряда на поверхности или в приповерхностной области пленки образуется высокопроводящий слой n-типа. Оценка электрофизических параметров образующегося слоя показала, что его интегральная проводимость при облучении в атмосфере азота близка к соответствующему значению при облучении в воздухе и составляет $1,4 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$. При облучении в атмосфере аргона интегральная проводимость образующегося n-слоя в два раза меньше интегральной проводимости исходной эпитаксиальной пленки (см. табл. 2).

Измерение электрофизических параметров образцов серии 714, облученных 1200 импульсов, показывает, что при воздействии объемного разряда в атмосфере азота и аргона наблюдается дальнейшее уменьшение величины интегральной проводимости образующегося высокопроводящего n-слоя с увеличением числа импульсов воздействия. Так, если после воздействия 600 импульсов в атмосфере аргона интегральная проводимость n-слоя составляла $4,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}$, то после воздействия 1200 импульсов ее величина уменьшается на два порядка. Изучение стабильности электрофизических параметров облученных в атмосфере аргона образцов показало, что в отличие от образцов, облученных в атмосфере воздуха, наблюдается релаксация электрофизических параметров

Таблица 2

Интегральная проводимость образующегося n-слоя

Серия	Газовая среда разряда	Количество импульсов	Интегральная проводимость σ
706	воздух	600	$8,6 \cdot 10^{-3}$
706	воздух	1200	$9,1 \cdot 10^{-3}$
706	азот	600	$1,4 \cdot 10^{-2}$
714	азот	1200	$1,0 \cdot 10^{-4}$
706	аргон	600	$4,6 \cdot 10^{-3}$
714	аргон	1200	$4,5 \cdot 10^{-5}$

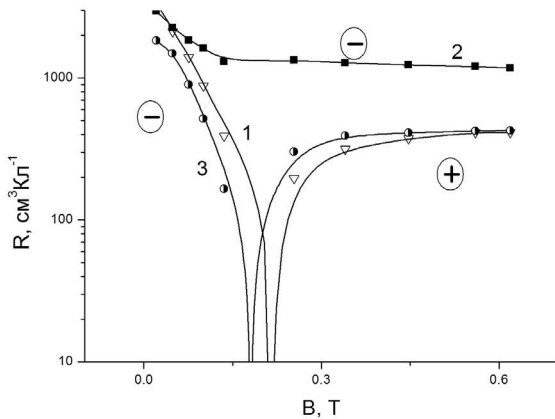


Рис. 3. Полевая зависимость коэффициента Холла эпитаксиальных пленок КРТ до (кривая 1), после (2) и через 3 месяца (3) после воздействия 600 импульсов объемного разряда в атмосфере аргона.

эпитаксиальных пленок к исходным значениям в течение 6 месяцев (рис. 3, кривая 3).

Необходимо отметить, что десятиминутная обработка образцов, подвергнутых воздействию объемного разряда в атмосфере воздуха, азота и аргона, в концентрированном растворе соляной кислоты приводит к восстановлению исходных значений электрофизических параметров образцов эпитаксиальных пленок.

Заключение

Полученные в работе экспериментальные данные показывают, что воздействие импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе, аргоне и азоте атмосферного давления приводит к изменению электрофизических свойств эпитаксиальных пленок КРТ, которое обусловлено, по-видимому, образованием в процессе воздействия приповерхностного высокопро-

водящего слоя n -типа проводимости. Электрофизические характеристики образующегося n -слоя и их стабильность определяются составом газовой атмосферы, в которой происходит объемный наносекундный разряд. Полученные первые результаты показывают возможность применения подобных типов воздействий для разработки технологий целенаправленного изменения свойств приповерхностных слоев узкозонных твердых растворов КРТ.

Авторы выражают благодарность Сидорову Ю.Г., Михайлову Н.Н., Варавину В.С., Дворецкому С.А., Якушеву М.В. за предоставленный эпитаксиальный материал.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 14.В37.21.0074).

Литература

1. Rogalskii A Infrared detectors. Second Edition. CRS Press. 2011. London, New York. (Amsterdam : Gordon and Breach)
2. Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В., Рябчиков А.И. Эффекты дальнего действия в ионно-имплантированных металлических материалах. — Томск: Изд-во НТЛ, 2004
3. Тарасова Л.В., Худякова Л.Н. // ЖТФ. 1969. Т. 39. №. 8. С. 1530
4. Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д. и др. // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 11. С. 1007
5. Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D. // Laser and Particle Beams. 2005. V. 23. No. 4. P. 545

Effect of the nanosecond volume gas discharge in air, argon and nitrogen on the electro-physical properties of the narrow band CdHgTe semiconductors

A.V. Voitsekhovskii¹, A.P. Kokhanenko¹, D.V. Grigoryev¹, A.G. Korotaev¹, A.S. Peters¹, V.F. Tarasenko², and M.A. Shulepov²

¹Tomsk State University
36 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: vav@elefot.tsu.ru

²Institute of High Current Electronics, Russian Academy of Sciences
2/3 Akademicheskyy av., Tomsk, 634055, Russia
E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

The effect of a nanosecond volume discharge in various gas environments at atmospheric pressure on the electro-physical properties of epitaxial film grown by molecular beam epitaxy has been studied. Experimental data show that the action of pulses of nanosecond volume discharge in air, argon and nitrogen at atmospheric pressure leads to changes in the electrophysical properties of MCT epitaxial films due to formation of a near-surface high-conductivity layer of the n-type conduction. The preliminary results show that it is possible to use such actions in the development of technologies for the controlled change of the properties of CMT narrow-band solid solutions and production of structures whose structure is heterogeneous with respect to conduction.

PACS: 73.40Qv, 73.21As, 85.60Gz, 73.61Ga.

Keywords: mercury cadmium telluride, volume gas discharge atmospheric pressure, epitaxial films, electro-physical properties.

Bibliography – 5 references

Received March 20, 2013