

К. ф.-м. н. А. БАЙДУЛЛАЕВА, В. В. БОРЩ, В. П. ВЕЛЕЩУК,
 д. ф.-м. н. А. И. ВЛАСЕНКО, к. ф.-м. н. Б. К. ДАУЛЕТМУРАТОВ,
 С. Н. ЛЕВИЦКИЙ, д. ф.-м. н. П. Е. МОЗОЛЬ

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва
 E-mail: vvvit@ukr.net

Дата поступления в редакцию
 16.03—12.07 2007 г.

Оппонент к. ф.-м. н. А. В. РЫБКА
 (ННЦ «ХФТИ», г. Харьков)

СТРУКТУРА Te–CdTe СО СВОЙСТВОМ ЭЛЕКТРОННОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ С ПАМЯТЬЮ

Формирование пленки теллура на поверхности кристалла CdTe при облучении импульсами рубинового лазера позволяет изготавливать структуры со свойством электронного переключения с памятью.

Контролируемое влияние наносекундных импульсов лазера на дефектную и кристаллическую структуру полупроводников A_2B_6 , A_3B_5 и твердых растворов на их основе открывает новые возможности целенаправленного изменения свойств и формирования приборных структур с заданными функциональными характеристиками, которые могут быть чувствительными к действию внешних полей различной физической природы.

Влияние интенсивного излучения может сопровождаться рядом процессов, связанных с генерацией точечных и протяженных дефектов, неоднородным плавлением и образованием периодических структур рельефа поверхности [1—5]. Для формирования поверхностных структур с заданными характеристиками необходимо установить оптимальные режимы лазерной обработки материалов и механизмы генерации, взаимодействия и накопления структурных дефектов высокой и управляемой концентрации. Процессы накопления и взаимодействия этих дефектов и, как следствие, структурные изменения поверхности сложным образом зависят от локальных температурных эффектов, дозы облучения, физической природы материала и других факторов.

В связи с этим в работе проведены экспериментальные исследования структурных, электрических и оптических свойств кристаллов CdTe до и после лазерной обработки, а также показан метод изготовления переключающих элементов с памятью.

Изготовление образцов. Резка образцов производилась электрохимическим методом. Размеры образцов составляли $5 \times 4 \times 1$ мм. Для обеспечения необходимой чистоты обработки поверхность образца шлифовалась и полировалась для удаления с поверхности слоя с нарушенной кристаллической решеткой. Поверхность образцов CdTe промывалась от различных примесей смесью «ацетон ($(CH_3)_2CO$) + толуол ($C_6H_5CH_3$) + четыреххлористый углерод (CCl_4)». Затем образцы обрабатывались в полирую-

щем травителе для снятия нарушенного слоя толщиной 200 мкм.

После механико-химической обработки образцы CdTe облучались импульсами многомодового рубинового лазера ($\hbar\omega = 1,78$ эВ), работающего в режиме модулированной добротности с длительностью импульса $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$ с. При облучении образцов тремя импульсами с плотностью мощности $I = 2$ МВт/см² на поверхности кристаллов CdTe образовывалась пленка теллура [6].

Электрические контакты создавали методом термического напыления при вакууме порядка 10^{-6} Па. Поскольку после облучения образуется Te–CdTe-структура, контакты напыляли как со стороны CdTe, так и со стороны слоя Te. Для контактов со стороны *n*-CdTe использовался слой индия, в случае *p*-CdTe сначала напыляли медь, потом наносили индий. Теллур имеет всегда *p*-тип проводимости [7], поэтому со стороны пленки Te напыляли электрод из сплава Pb50%+ Sn50%.

Образование теллура на поверхности CdTe. При некоторой дозе облучения (при облучении 3 импульсами с плотностью мощности ниже порога плавления поверхности образца $I = 2 \dots 5$ МВт/см²) на поверхности кристаллов CdTe наблюдается появление пленки теллура и образование структур микронных размеров (рис. 1). Пленка теллура имеет островковый характер распределения по поверхности кристалла, а ее толщина зависит от дозы облучения.

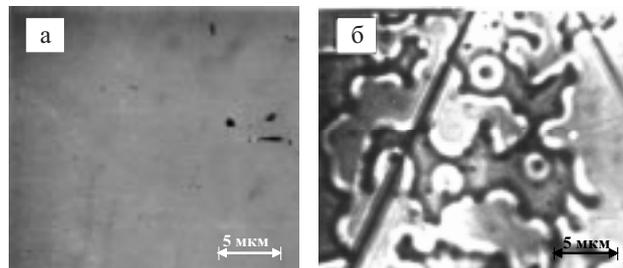


Рис. 1. Микрофотография поверхности кристалла CdTe до (а) и после (б) образования пленки теллура

Отметим, что при облучении рубиновым лазером кристаллов CdTe ($E_g = 1,49$ эВ) поглощение оптического излучения происходит в тонком приповерхностном слое толщиной $d \sim \alpha^{-1} \approx 10^{-4} \dots 10^{-5}$ см (коэффициент поглощения $\alpha = 6 \cdot 10^4$ см⁻¹ [5, 6]). Поэтому ожидается, что основные структурные из-

менения свойств кристаллов CdTe будут происходить в тонком слое, толщина которого определяется величиной α^{-1} и длиной тепловой диффузии $l = \sqrt{\chi\tau} = (1...7) \cdot 10^{-5}$ см, $\chi \approx 7 \cdot 10^{-6}$ м²/с [6].

Появление пленки теллура подтверждается также исследованием спектров комбинационного рассеяния света (КРС). После облучения импульсами излучения рубинового лазера интенсивность ниже порога плавления или разрушения кристалла спектр КРС изменяется и появляются дополнительные полосы $\nu = 124,79$ см⁻¹, $\nu = 142,86$ см⁻¹ и $\nu = 93,2$ см⁻¹ (рис. 2).

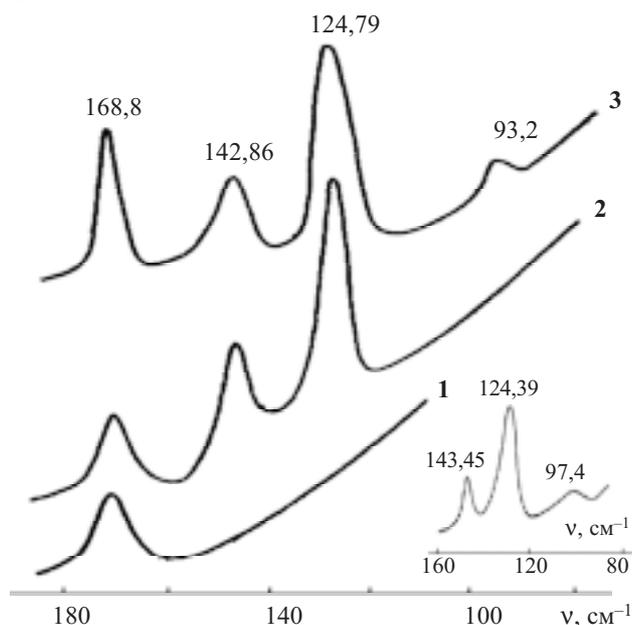


Рис. 2. Спектры КРС поверхности (111) CdTe-образца до облучения (1) и после облучения (2, 3) импульсами излучения рубинового лазера при разной плотности мощности ($I_2 < I_3$). На вставке: спектры КРС кристаллического теллура

Анализ спектрального положения, соотношения интенсивностей, а также сопоставление спектров КРС, измеренных на поверхности кристаллов CdTe и Te с исследованиями КРС на разных фазах Te [7, 8] (рис. 2, вставка), позволяют сделать вывод, что эти полосы соответствуют A_1 - и E-колебательным модам тригонального теллура. Таким образом, в спектрах КРС облученных кристаллов CdTe присутствуют колебательные полосы, частотное положение и соотношение интенсивностей которых соответствует Te.

Поскольку коэффициент поглощения Te в исследуемой области длин волн достигает значений 10^6 см⁻¹, то факт регистрации полосы LO (CdTe) через пленку теллура позволяет заключить, что толщина последней составляет несколько десятков ангстрем. Наблюдаемая большая полуширина линий Te и их низкоэнергетическое смещение относительно линий монокристаллического теллура являются проявлением размерных эффектов, характерных для поликристаллической структуры теллура с достаточно малыми размерами кристаллитов [5].

Образование пленки теллура на поверхности облученного образца CdTe связано преимущественно с обеднением приповерхностных слоев атомами кадмия вследствие их большей летучести, чем атомов теллура. Результаты масс-спектрометрических исследований состава потоков атомов, которые испаряются при лазерной обработке CdTe, показали, что при установлении стационарного потока количество атомов Cd в четыре раза превышает количество атомов Te [9]. Таким образом, приповерхностный слой образца при лазерном облучении обедняется кадмием, а на поверхности образуется пленка теллура. Возможным механизмом формирования такой пленки может быть диффузия междоузельного теллура и его накопление на поверхности. О возможности “стекания” на поверхность собственных электронов и примесей в разнообразных полупроводниках свидетельствуют результаты работы [10].

Оценка коэффициента диффузии ($D=L^2\tau^{-1}$) Te в момент лазерного облучения (при толщине обогащенного теллуrom слоя $L=20$ нм) дает значение $D \approx 2 \cdot 10^{-4}$ см²·с⁻¹. Это на 10 порядков больше коэффициента термодиффузии Te при 650°C ($1,5 \cdot 10^{-14}$ см²·с⁻¹) [11], что, по-видимому, можно объяснить известным механизмом радиационно-стимулированной диффузии [12].

Вольт-амперные характеристики экспериментальных образцов переключающих элементов на основе Te–CdTe. Вольт-амперные характеристики структур, полученных при обработке лазерным излучением с плотностью мощности $I=5$ МВт/см² кристаллов CdTe:In с удельным сопротивлением $\rho \approx 10^5$ Ом·см и CdTe:Cl с $\rho \approx 10^9$ Ом·см, измеренные при $T=300$ К, приведены соответственно на рис. 3, а и б. Характерной особенностью ВАХ является переключение структуры из высокоомного в низкоомное состояние при приложении напряжения в прямом смещении. При этом сопротивление структуры падает до 10 Ом·см. Напряжение переключения структур составляет 0,3 и 200 В. Пороговые характеристики переключения зависят от сопротивления исходного кристалла.

Данной бистабильной ВАХ с переключением при пороговой величине напряжения свойственно сохранение низкоомного состояния без подачи питания на структуру. Структура “запоминает” переключенное низкоомное состояние после снятия напряжения и может быть возвращена в высокоомное состояние путем подачи на него порогового напряжения в обратном смещении.

Исследование ВАХ образцов показало, что после смывки слоя Te в растворе 1н. КОН в метаноле полностью исчезает эффект переключения. Это свидетельствует о том, что за процессы эффекта переключения отвечает проводящий слой Te на поверхности CdTe.

Эффект электронного переключения, который возникает при облучении кристаллов CdTe, обусловлен специфическими свойствами полупроводниковых материалов сохранять возбужденную светом или электрическим полем проводимость, которая пре-

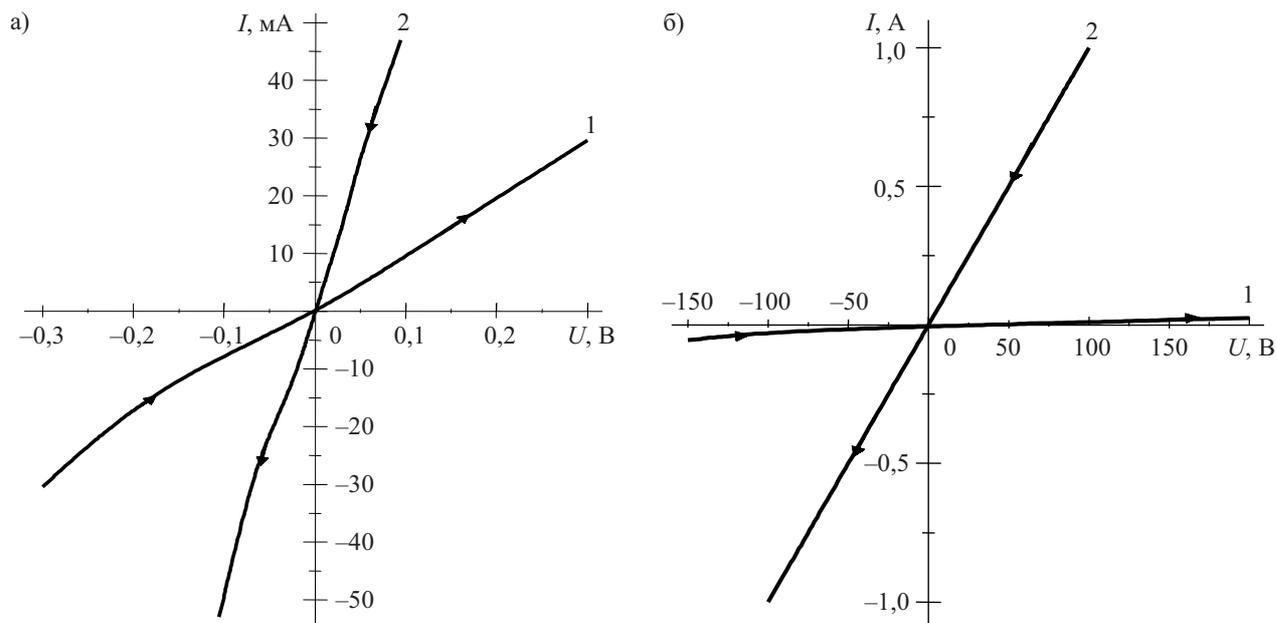


Рис. 3. ВАХ структуры Te–CdTe:In (а) и структуры Te–CdTe:Cl (б). Переключение структуры из высокоомного состояния (1) в низкоомное (2)

вышает равновесную в несколько раз и сохраняется на протяжении 10^4 – 10^6 с.

Данный эффект, обнаруженный как в кристаллических [14–16], так и в аморфных [17, 18] полупроводниках, на сегодня широко исследован, но физика электронного механизма переключения с памятью остается дискуссионной [19].

Вероятно, в нашем случае данный эффект обусловлен наличием потенциальных барьеров и флуктуациями изгибов зон за счет макродефектов. К таким дефектам относятся, например, межкристаллические границы, дислокации, сосредоточение точечных дефектов и выделение сторонних фаз в виде металлических или диэлектрических частиц. Наличие макродефектов в виде островкового слоя приводит к локальным усилениям напряженности поля, а существование потенциальных барьеров между слоем Te и матрицей CdTe обеспечивает большие времена жизни неравновесных носителей. Это обусловлено тем, что на границе макродефектов и на поверхности кристалла формируются отталкивающие кулоновские барьеры, которые препятствуют рекомбинации свободных носителей и обеспечивают эффекты переключения проводимости с памятью.

Переход из высокоомного состояния в низкоомное можно объяснить перераспределением в процессе прохождения темного тока электронов между центрами с разной энергией ионизации, аналогично тому, как это происходит при нагревании кристалла или освещении. В нашем случае в роли такого центра может выступать слой Te, образование которого подтверждается появлением низкотемпературного пика в спектрах термостимулированной проводимости. Дефекты, обусловленные теллуром, могут быть приняты как новые центры прилипания в CdTe [13].

Таким образом, независимо от типа проводимости и кристаллической структуры исходного CdTe, после его облучения рубиновым лазером с плотностью мощности $I=5$ МВт/см² образуется структура Te–CdTe, которая обладает свойством электронного переключения с памятью и на основе которой возможно создание переключающего элемента с памятью. Величина порога переключения зависит от сопротивления исходного кристалла.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Байдуллаева А., Булах М. Б., Власенко А. И. и др. Динамика развития поверхностных структур в кристаллах *p*-CdTe при облучении импульсным лазерным излучением // ФТП.— 2004.— Т. 38, вып. 1.— С. 26–29.
2. Володин Б. Л., Емельянов Б. И. Дефектно-деформационный механизм образования пор, дислокационных петель и дислокационных структур и его экспериментальные проявления // Изв. АН СССР. Сер. Физ.— 1991.— Т. 55, № 7.— С. 1274–1284.
3. Аполлонов В. В., Прохоров А. М., Хомич В. Ю., Четкин С. А. Термоупругое воздействие периодического лазерного излучения на поверхность твердого тела // Квантовая электроника.— 1982.— Т. 9, № 2.— С. 343–353.
4. Emelyanov V. I., Kashkarov P. K. Laser-induced defect formation in semiconductors // Appl. Phys. A.— 1992.— Vol. 55.— P. 161–166.
5. Артамонов В. В., Байдуллаева А., Власенко А. И. и др. Атомно-силовая микроскопия и рамановское рассеяние света лазерно-индуцированного структурного разупорядочения на поверхности *p*-CdTe // ФТТ.— 2004.— Т. 46, вып. 8.— С. 1489–1493.
6. Alpen V. U., Doukhan J. C., Tsgaing R., Gross P. Defect induced optical absorption near the electronic band edge of tellurium // Phys. Status Solidi (b).— 1973.— Vol. 55, N 4.— P. 667–671.
7. Aoki K., Shimomuro O., Mimomura S. et al. Raman scattering of trigonal Se and Te at very high pressure // J. Phys. Soc. Japan.— 1980.— Vol. 48, N 3.— P. 906–908.

8. Amirtharaj P. M., Pollak F. H. Raman scattering study of the properties and removal of excess Te on CdTe surfaces // Appl. Phys. Lett.— 1984.— Vol. 45, N 7.— P. 789—791.

9. Дымко Л. Н., Кица М. С., Лихобабин Н. П. Исследование эффекта переключения в монокристаллах CdTe // Физическая электроника. (Львов.)—1987.— № 34.— С. 33—36.

10. Легбайн Д., Шелонин Е. Исследование влияние поверхности на поведение дефектов в кремнии, облученном нейтронами // ФТП.— 1984.— Т. 18, вып. 5.— С. 808—811.

11. Логинов Ю. Ю., Браун П. Д. Образование примесных выделений в CdTe, легированном индием, после отжига и облучения ионами и электронами // ФТТ.— 1995.— Т. 37, вып. 10.— С. 3115—3123.

12. Стрекалов В. Н. Диффузия в условиях лазерного отжига полупроводников // ФТП.— 1986.— Т. 20, вып. 2.— С. 361—363.

13. Байдуллаева А., Джумаев Б., Корсунская Н. Е. и др. Влияние пленки Te, образующейся на поверхности CdTe при лазерном облучении, на их электрические и фотоэлектрические свой-

ства. Имитация эффектов, связанных с метастабильными дефектами // Поверхность. Физика, химия, механика.— 1989.— № 2.— С. 129—133.

14. Дрижук А. Г., Сидоров В. Г., Сидоров Д. В., Шагало М. Д. Переключающее устройство на гетероструктуре ZnTe—GaN // Письма в ЖТФ.— 1997.— Т. 23, вып. 20.— С. 79—82.

15. Дрижук А. Г., Сидоров В. Г., Сидоров Д. В., Шагало М. Д. Фотоприемник с переключением и памятью на гетероструктуре CdS—GaN // Там же.— С. 75—78.

16. Агринская Н. В., Алексеенко М. В., Матвеев О. А. Явления формовки и переключения в кристаллах CdTe // ФТП.— 1975.— Т. 9, вып. 10.— С. 1962—1965.

17. Костыльёв С. А., Шкут В. А. Электронное переключение в аморфных полупроводниках.— Киев: Наукова думка, 1978.

18. Меден А., Шо М. Физика и применение аморфных полупроводников.— М.: Мир, 1991.

19. Чабан И. А. Эффект переключения в халькогенидных стеклах // ФТТ.— 2007.— Т. 49, вып. 3.— С. 405—410.

*Д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК, к. ф.-м. н. В. Н. КАТЕРИНЧУК,
к. ф.-м. н. В. В. НЕТЯГА, А. В. ЗАСЛОНКИН*

Украина, г. Черновцы, ЧО Ин-та проблем материаловедения
им. И. Н. Францевича
E-mail: chimsp@ukrpost.ua

Дата поступления в редакцию
05.07 2007 г.

Оппонент д. х. н. В. Н. ТОМАШИК
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ГЕТЕРОПЕРЕХОД НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА $FeIn_2Se_4$, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ БРИДЖМЕНА

Фотоэлектрические измерения параметров гетероперехода $n-InSe-p-FeIn_2Se_4$ свидетельствуют о возможности получения качественных $p-n$ -переходов.

Магнитные свойства полупроводников могут использоваться для управления потоком носителей не только с помощью величины и полярности электрического напряжения, но и с помощью изменения направления и величины напряженности магнитного поля. В этой связи интерес к слоистым магнитным полупроводникам обусловлен сильной анизотропией их свойств и, как следствие, возможностью неоднородного распределения примеси в кристаллической решетке. Различные состояния магнитной примеси могут приводить к образованию ферромагнитных доменов, что представляет интерес для практических применений.

Из литературных источников следует, что кристаллический $FeIn_2Se_4$ можно получать в виде пленок вакуумным испарением [1, 2] или тонких пластин методом химических транспортных реакций [3]. На основе таких кристаллов создавались барьеры Шоттки и анализировались их диодные свойства. В настоящей работе методом Бриджмена были получены магнитные кристаллы $FeIn_2Se_4$ и исследованы свойства гетероперехода с ван-дер-ваальсовским контактом на гетерогранице.

Эксперимент

Крупные слитки кристаллов $FeIn_2Se_4$ разрезали на шайбы, а затем из них вырезали подложки по плоскостям спайности слоев. Поверхность сколотых пластин была зеркальной и пригодной для создания гетероперехода (ГП) методом ван-дер-ваальсовского контакта [4]. Из эффекта Холла установлено, что выращенные кристаллы имеют p -тип проводимости. Концентрация основных носителей тока и холловская подвижность вдоль слоев составляют соответственно $p=(2...3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $\mu_H=10 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

В качестве второго компонента ГП были выбраны кристаллы $n-InSe$, также выращенные методом Бриджмена. Использовали как нелегированные ($n=3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), так и легированные примесью германия ($n=1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) кристаллы. Они служили фронтальным полупроводником и поэтому скалывались со слитка толщиной в 20—50 мкм.

Вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные (ВФХ) характеристики ГП исследовали на установке „Schlumberger SI 1255” с компьютерным интерфейсом. Кроме измерений, проводимых при комнатной температуре, исследовали также температурные зависимости ВАХ с целью установления механизма протекания тока через ГП.

Спектры fotocувствительности изготовленных ГП получали с помощью монохроматора МДР-3 с разрешающей способностью 2,6 нм/мм. Все спек-