

УДК 535.215:546.48'49'24

Метастабильное поведение вольт-амперной характеристики p — n -переходов на основе CdHgTe

О. А. Солтанович, Е. Б. Якимов, Н. А. Ярыкин
Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,
Черноголовка Московской обл., Россия

Исследованы n^+ - p -переходы, изготовленные в кристаллах $\text{Cd}_{0,4}\text{Hg}_{0,6}\text{Te}$ p -типа с помощью ионной имплантации. Обнаружено, что обратный ток p - n -перехода при температуре жидкого азота существенно зависит от условий охлаждения образца от комнатной температуры: при охлаждении без смещения наблюдается состояние с малым обратным током, в случае охлаждения с обратным смещением обратный ток в десятки раз больше. Состояния устойчивы при азотной температуре; обратимый переход между состояниями достигается выдержкой при комнатной температуре и последующим охлаждением в соответствующих условиях. Исследование структур методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) показало, что изменения обратного тока сопровождаются перестройкой спектра глубоких уровней (ГУ) и могут быть связаны с наличием метастабильных глубоких центров. Изучена кинетика метастабильного перехода. Показано, что наблюдаемые кинетические зависимости удовлетворительно объясняются уширением энергии активации перехода вследствие локальной неоднородности состава твердого раствора.

Фотоэлектрические приемники на основе тройного соединения CdHgTe широко используются в современной ИК-оптике (волоконно-оптические линии связи, приборы ночного видения и т. д.). При этом функциональные характеристики приборов, такие как чувствительность и обнаружительная способность, в значительной степени определяются обратным током через p - n -переход. В связи с этим исследования природы и особенностей поведения обратного тока и попытка идентификации механизмов, ответственных за токи утечки в p - n -переходах, необходимы для улучшения параметров приборов.

В настоящей работе рассмотрено метастабильное поведение вольт-амперной характеристики (ВАХ) p - n -переходов на основе p - CdHgTe состава $x = 0,4$ и показано, что оно может быть связано с изменениями в спектре глубоких уровней в запрещенной зоне полупроводника.

Вольт-амперные характеристики

Измерения проведены на n^+ - p -переходах площадью $0,25 \text{ мм}^2$, изготовленных в кристаллах p - CdHgTe состава $x = 0,4$ имплантацией ионов бора. Концентрация носителей в p -области, определенная по вольт-фарадной характеристике, при температуре жидкого азота составляла $1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Измерения ВАХ при температуре 78 К показали, что в исследованных диодах обратный ток существенно зависит от величины обратного смещения, приложенного к p - n -переходу в процессе его охлаждения от комнатной температуры (рис. 1). При охлаждении без смещения формируется состояние (назовем его А), которое характеризуется ВАХ с малым обратным током (см. рис. 1, кривая 1). В случае охлаждения при обратном смещении

(состояние Б) величина тока утечки в десятки раз больше (см. рис. 1, кривые 2, 3). При азотной температуре состояния, соответствующие различным ВАХ, сохраняются, по крайней мере, в течение нескольких часов независимо от приложенного напряжения. В то же время структуру можно обратно переводить из одного метастабильного состояния в другое. Для этого при переходе из А в Б надо выдержать p - n -переход при обратном смещении в течение 10 мин при комнатной температуре, а затем охладить, не убирая напряжения с образца. Обратный переход происходит при более низкой температуре — достаточно выдержать образец в течение 5 мин при 270 К без напряжения и охладить.

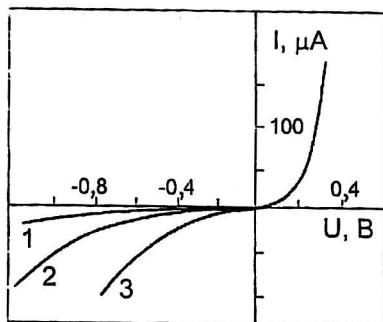


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики n^+ - p -переходов на p - $Cd_{0,4}Hg_{0,6}Te$, измеренные при температуре 78 К для различных условий охлаждения образца от комнатной температуры:
 1 — охлаждение без смещения;
 2 — охлаждение при обратном смещении 0,3 В;
 3 — охлаждение при обратном смещении 0,5 В

Спектры глубоких уровней

Как показано в работах [1—5], обратный ток p - n -переходов на основе p - $CdHgTe$ в значительной степени может определяться центрами с ГУ. Поэтому для выяснения природы наблюдаемой метастабильности ВАХ нами исследовался энергетический спектр ГУ, формирующийся в кристалле при различных условиях охлаждения. Известно, что одним из наиболее информативных методов изучения спектра ГУ в полупроводниках является РСГУ.

В стандартном варианте этого метода [6] анализируется релаксация барьерной емкости обратного смещенного p - n -перехода, обусловленная термическим выбросом носителей с неравновесно заполненных ловушек в области объемного заряда; заполнение ловушек производится периодически импульсом прямого напряжения. На исследуемых в настоящей работе p - n -переходах для изучения спектра ГУ наряду с релаксацией емкости анализировалась релаксация активной составляющей высокочастотной проводимости G обратного смещенного p - n -перехода. Это связано с тем, что когда p - n -переход находится в состоянии Б, активная составляющая высокочастотной проводимости, как выяснилось, также зависит от заполнения центров с ГУ, причем ее изменение при заполнении ловушек столь велико, что не позволяет выделить из наблюдаемой релаксации импеданса емкостную составляющую.

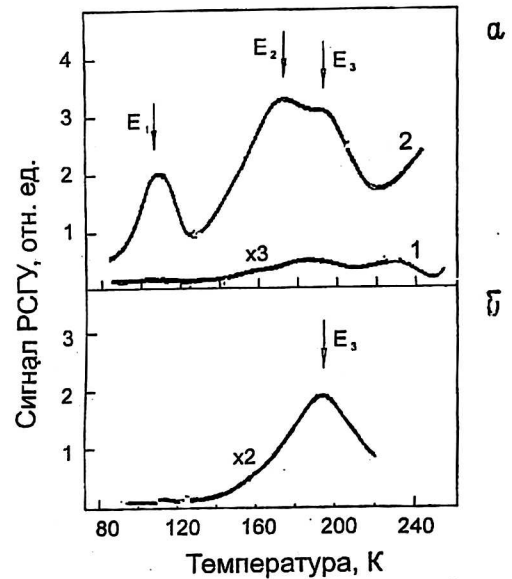
Заполнение глубоких центров импульсом прямого напряжения приводило к уменьшению проводимости, а последующая релаксация имела зависящую от температуры постоянную времени, что позволяет связать ее с термическим освобождением неравновесно заполненных центров и использовать для их характеристики. Релаксация проводимости G обрабатывалась аналогично релаксации емкости в стандартном варианте РСГУ. Надо отметить, что полученные таким образом спектры следует отличать от токовой РСГУ [7], где анализируется непосредственно полный ток (или заряд) термически освобожденных носителей заряда, и от РСГУ проводимости [8], регистрирующей

релаксацию проводимости в канале полевого транзистора, управляемого затвором.

В спектрах РСГУ высокочастотной проводимости (G-РСГУ) (рис. 2, а) в состоянии Б было обнаружено три пика, соответствующих ГУ E_1 , E_2 и E_3 , а в состоянии А — выявить их не удалось. Спектры емкостной РСГУ по указанным выше причинам можно было измерить только для состояния А (см. рис. 2, б), и в них проявился только один пик, близкий по параметрам к E_3 . По сдвигу температуры максимума пиков при изменении анализируемой постоянной времени были определены энергии активации обнаруженных ГУ. Они составили $E_v + 0,17$ эВ, $E_v + 0,27$ эВ и $E_v + 0,31$ эВ для пиков E_1 , E_2 и E_3 , соответственно. При определении энергии активации учитывалось наличие атермических процессов, поскольку амплитуда пиков зависела от анализируемой постоянной времени [9].

Рис. 2. Спектры РСГУ высокочастотной проводимости (а) и емкостной РСГУ (б), измеренные после охлаждения образца от комнатной температуры до 78 К в различных условиях:

- а — 1 — охлаждение без смещения, измерение при обратном смещении 0,3 В;
2 — охлаждение и измерение при обратном смещении 0,3 В; б — охлаждение без смещения, измерение при обратном смещении 0,3 В



Таким образом, сопоставление между ВАХ и спектрами РСГУ позволяет связать изменение обратного тока при переходе образца из состояния А в состояние Б и обратно с перестройкой спектра ГУ в запрещенной зоне полупроводника. Можно предположить существование, по крайней мере, двух метастабильных центров с ГУ E_1 и E_2 , которые в состоянии А электрически неактивны, не обнаруживаются в спектрах РСГУ и не влияют на обратный ток p - n -перехода, а в состоянии Б дают уровни в запрещенной зоне полупроводника и обуславливают большие токи утечки.

Кинетика метастабильного перехода

Для получения дополнительной информации о характере наблюдаемой метастабильности нами проводилось исследование кинетики метастабильного перехода из состояния А в состояние Б. Исследовать кинетику обратного перехода (из состояния Б в состояние А) оказалось невозможным по методическим причинам. Перевод образца из состояния А в состояние Б осуществлялся путем изохронного отжига при обратном смещении 0,5 В в диапазоне температур 220—310 К. Для каждой температурной точки измерялись величина обратного тока при 78 К и амплитуда пиков РСГУ. Результаты из-

мерений приведены на рис. 3. Видно, что амплитуда пика РСГУ и прирост обратного тока при 78 К изменяются по одинаковому закону, что также свидетельствует в пользу нашего предположения о том, что увеличение обратного тока *p-n*-перехода в состоянии Б, наблюдаемое на ВАХ, связано с изменением спектра ГУ.

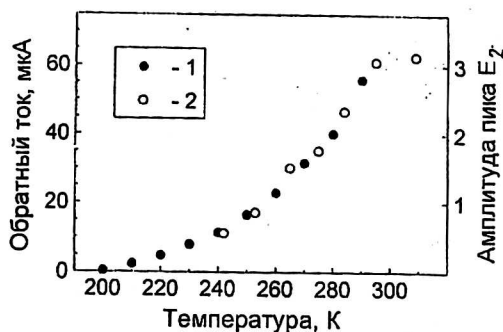


Рис. 3. Прирост обратного тока при 78 К (1) и амплитуда пика E_2 (2) в процессе изохронного отжига при метастабильном переходе из состояния А в состояние Б: время отжига 10 мин, обратный ток и спектры РСГУ измерены при обратном смещении 0,3 В

Если предположить, что метастабильный переход имеет термоактивационный характер и связан с перестройкой глубоких центров, то изменение концентрации глубоких центров в процессе изохронного отжига можно представить в виде:

$$N(\Delta t) = N_0 \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right),$$

где $\tau = \tau_0 e^{\frac{E_a}{kT}}$;

N_0 — полная концентрация глубоких центров;

N — доля центров, образующихся за время изохронного отжига Δt ;

$1/\tau_0$ — частота попыток;

E_a — энергия активации метастабильного перехода;

k — постоянная Больцмана;

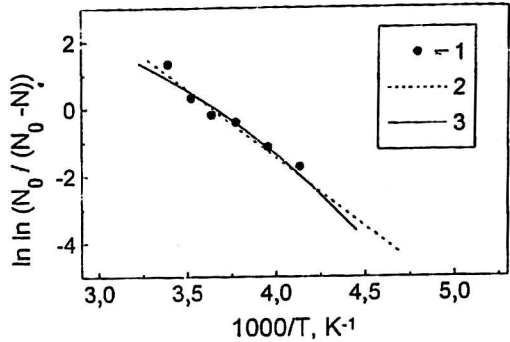
T — температура.

Тогда из зависимости $\ln(\ln(N_0/(N_0-N))) = f(1/T)$ можно определить энергию активации перехода E_a .

Применение такого подхода к экспериментальным данным (точки на рис. 4) дает $E_a = 0,4$ эВ и $\tau_0 = 10^{-4}$ с (см. пунктирную линию на рис. 4). Однако полученное значение частоты попыток $1/\tau_0$ для ожидаемых в данном случае процессов атомных перескоков слишком мало и физически недостоверно. Обычно оно составляет $10^{10} \div 10^{12}$ с⁻¹. К тому же, из рис. 3 видно, что переход происходит в довольно широком температурном диапазоне и, возможно, уширен по энергии. Моделирование процесса метастабильного перехода в предположении о том, что вследствие неоднородности состава твердого раствора энергия активации метастабильного перехода распределена по Гауссу с дисперсией 10 % позволяет удовлетворительно описать экспериментальные данные (см. рис. 4, сплошная линия). Полученное при этом значение энергии активации составляет $E_a = 0,74$ эВ при разумной величине $\tau_0 = 10^{-11}$ с.

Рис. 4. Экспериментальные данные и результаты моделирования кинетики метастабильного перехода из состояния А в состояние Б в процессе изохронного отжига:

1 — амплитуда пика РСГУ E_2 ; 2 — линейная аппроксимация (без учета уширения), $E_a = 0,4$ эВ, $\tau_0 = 10^{-4}$ с; 3 — моделирование с учетом уширения энергии перехода по Гауссу с дисперсией 10 %, $E_a = 0,74$ эВ, $\tau_0 = 10^{-11}$ с



Заключение

Резюмируя изложенные факты, можно предложить следующую модель, объясняющую основные экспериментальные результаты. В исследованных кристаллах p -CdHgTe имеются конфигурационно-метастабильные дефекты, которые в состоянии А (охлаждение с захваченной дыркой) перестраиваются таким образом, что не обнаруживаются методом релаксационной спектроскопии (например обладают в этом состоянии мелкими уровнями). В конфигурации Б, реализующейся при охлаждении с выброшенной дыркой, эти дефекты приводят к появлению в запрещенной зоне полупроводника глубоких уровней, которые, участвуя в процессах генерации—рекомбинации или туннелирования, определяют большую величину обратного тока p - n -перехода.

Литература

1. Jones C. E., Nair V., Polla P. L.//Appl. Phys. Lett. 1981. V. 39. № 3. P. 248.
2. Anderson W. W., Hoffman H. J.//Ibid. V. 53. № 12. P. 9130.
3. Bhar R. K., Koul S. K., Dhar V., Gupta S.//Semicond. Sci. Technol. 1996. V. 11. P. 1901.
4. Yuan H., Yang X., Tong F.//Ibid. 1993. V. 8. P. 700.
5. Gumenjuk-Sichevskaya J. V., Sizov F. F.//Ibid. 1999. V. 14. P. 1124.
6. Lang D. V.//J. Appl. Phys. 1974. V. 45. № 7. P. 3023.
7. Blood P., Orton J. W. The Electrical Characterization of Semiconductors: Majority Carriers and Electron States. Academic Press Ltd. — London, 1992. P. 389.
8. Adlerstein M. G.//Electron. Lett. 1976. V. 12. № 12. P. 297.
9. Soltanovich O. A., Yakimov E. B., Yarykin N. A.//Phys. Stat. Sol. (a). 1993. V. 136. P. 455.

Metastable behavior of current-voltage characteristics of p–n-junctions formed on CdHgTe

O. A. Soltanovich, E. B. Yakimov, N. A. Yarykin

Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials RAS, Chernogolovka, Russia

N⁺-p-junctions formed in p-type Hg_{0,6}Cd_{0,4}Te crystals by ion implantation are studied. It is found that leakage current of the structures at liquid nitrogen temperature is strongly dependent on the cooling conditions from room temperature: leakage current is small after bias-off cooling and several decades higher after bias-on cooling. Both states are stable at 78 K during hours; the reversible transitions between the states can be performed by room temperature annealing and subsequent cooling under appropriate bias. Investigation of the structures by the DLTS technique shows that the variations of leakage current are accompanied by transformations of the deep level spectrum of the crystal and, therefore, can be associated with the reconstruction of metastable centers located in space charge region of the p-n-junction. The kinetics of the metastable transition indicate possible spreading of the transition activation energy due to local inhomogeneity of the alloy composition.