

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КРИСТАЛЛОВ $Cd_xHg_{1-x}Te$ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Панин Г. Н., Якимов Е. Б.

С использованием метода наведенного электронным пучком тока обнаружено изменение электрических свойств приповерхностных слоев кристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$ при воздействии низкоэнергетичных электронов. Уже при малых временах облучения в приповерхностном слое кристаллов как n -, так и p -типа проводимости возникает встроенное электрическое поле, эффективно разделяющее неравновесные носители заряда. Его появление объясняется увеличением концентрации акцепторных центров и образованием более широкозонного материала в области, прилегающей к месту воздействия. Обращается внимание на влияние дефектной структуры кристалла в наблюдаемых изменениях.

Введение. В настоящее время методы, основанные на использовании электронных пучков с энергией 1—40 кэВ, широко применяются для характеристики полупроводниковых кристаллов и структур на их основе. Особенно перспективны такие методы для локальной диагностики с пространственным разрешением в микронном и субмикронном диапазонах. Однако предельное пространственное разрешение в этих методах определяется обусловленным воздействием электронного пучка необратимым изменением свойств приповерхностных слоев [1]. Особенно существенны эти эффекты в кристаллах сложных полупроводников, таких как $Cd_xHg_{1-x}Te$. Так, в [2] обнаружено, что электронный пучок с энергией несколько кэВ при плотностях тока $\sim 10^{-3}$ А/см² приводит к обеднению поверхности атомами ртути. При этом приповерхностный слой обедняется на глубину до нескольких десятков Å, энергетические зоны вблизи поверхности изгибаются вверх, приповерхностный слой приобретает более выраженный p -тип проводимости [3]. Обеднение поверхности ртутью объяснялось термодесорбцией [3] либо электронно-стимулированной десорбцией ртути [4]. Высокая чувствительность этих кристаллов к воздействию низкоэнергетичных электронов делает их удобным объектом для изучения механизмов воздействия низкоэнергетичных электронов на свойства приповерхностных слоев. В настоящей работе методом наведенного тока исследовано влияние облучения в растровом электронном микроскопе на электрические свойства приповерхностных слоев кристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$. Поскольку изменение стехиометрии приповерхностных слоев должно сопровождаться изменением их электрических свойств, представляло интерес изучить эти изменения, тем более что методы изучения электрических свойств в отличие от методов изучения состава кристалла позволяют выявлять более низкие концентрации точечных дефектов.

Методика эксперимента

Детальные исследования проводились на кристаллах $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0.4$) p - и n -типа проводимости с концентрацией носителей $\sim 10^{16}$ см⁻³, однако подобные изменения наблюдались и на кристаллах другого состава. Подготовка поверхности кристалла включала механическую шлифовку, химическое удаление нарушенного слоя и полировку в 8 % Vg_2 в HVg . Для изготовления омических

контактов к кристаллам *p*- и *n*-типа проводимости использовались химическое осаждение Au и сплавление In соответственно.

Облучение электронами с энергией $E_p = 10-35$ кэВ и током пучка $I_p = 10^{-6}-10^{-8}$ А проводилось в камере растрового электронного микроскопа JSM-35C.

Исследовались облученные образцы в том же микроскопе при токе пучка $10^{-10}-10^{-9}$ А, при этом сигнал с образца снимался двумя омическими контактами, расположенными по обе стороны от места облучения. При такой геометрии сигнал наведенного тока появляется лишь при наличии встроенных электрических полей, разделяющих рожденные электронным пучком электронно-дырочные пары. Таким образом, если при воздействии электронного пучка свойства облучаемой области изменяются и на границе области с измененными свойствами и исходным кристаллом формируется потенциальный барьер, то он может быть легко выявлен методом наведенного тока.

Результаты и обсуждение

Формирование потенциальных барьеров было обнаружено при облучении кристаллов как *n*-, так и *p*-типа проводимости уже при воздействии сфокусированного в точку электронного пучка с энергией $E_p = 25$ кэВ и током $I_p =$

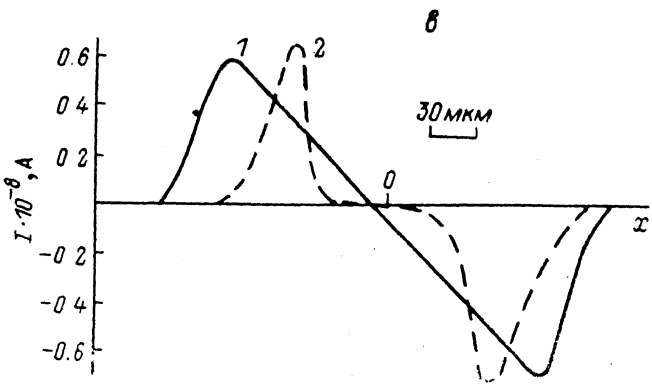
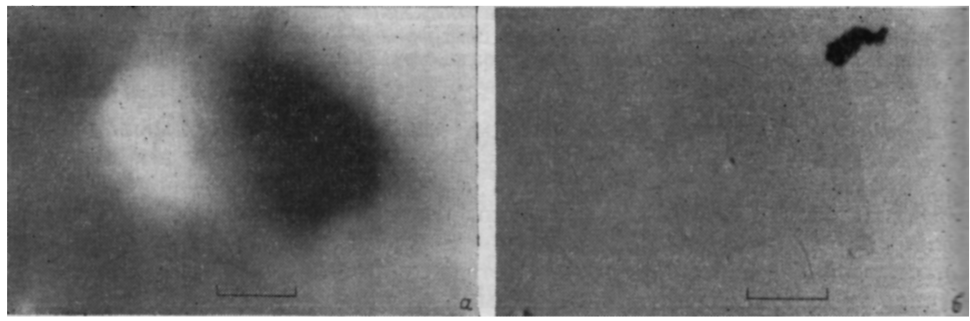


Рис. 1. РЭМ изображения $n\text{-Cd}_{0.4}\text{Hg}_{0.6}\text{Te}$ после воздействия электронного пучка в режимах наведенного тока (а) и вторичной электронной эмиссии (б), профили наведенного тока через точку облучения при времени облучения $t \geq 2$ с, $I_p = 10^{-7}$ А (1, 2), $E_p = 25$ (1) и 33 кэВ (2) (а).

$= 1.5 \cdot 10^{-7}$ А в течение нескольких секунд. Однако характер изменений различался для кристаллов разного типа проводимости. Результаты, полученные на образцах *n*-типа, представлены на рис. 1, где изображены облученная область в режимах вторично-электронной эмиссии и наведенного тока и профили наведенного тока, полученные при сканировании электронного пучка по линии, пересекающей точку облучения, при разных режимах облучения. Следует от-

метить, что размеры области, в которой изменяются электрические свойства, достигают ~ 100 мкм в параллельной поверхности плоскости, что существенно превышает размеры области, на которую непосредственно воздействовал пучок. При увеличении времени облучения профиль наведенного тока существенно не изменялся. Повышение же энергии пучка приводило к испарению материала и уменьшению расстояния между экстремумами наведенного тока (рис. 1, в, кривая 2), при этом в области между экстремумами появлялось плато. В кристаллах p -типа проводимости знак контраста в режиме наведенного тока изменялся при увеличении времени облучения (рис. 2), при этом между экстре-

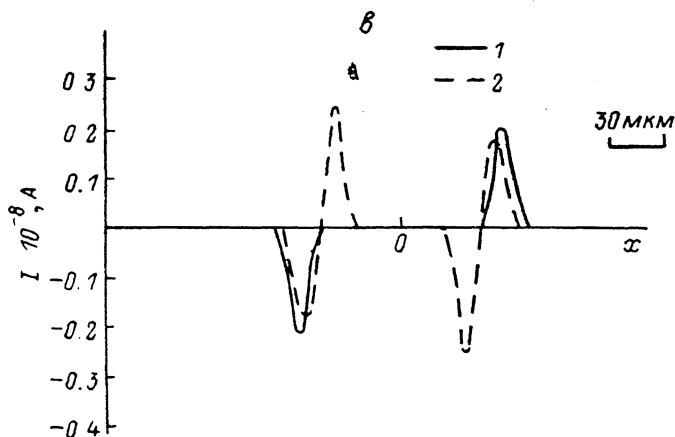
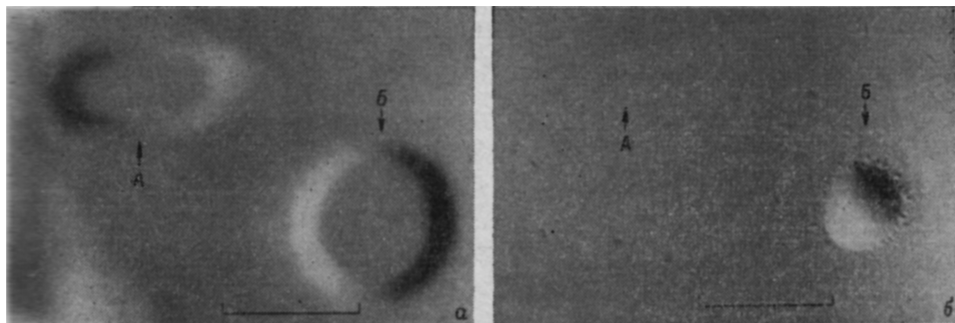


Рис. 2. РЭМ изображения p - $\text{Cd}_{0.4}\text{Hg}_{0.6}\text{Te}$ после воздействия электронного пучка в режимах наведенного тока (а) и вторичной электронной эмиссии (б), профили наведенного тока через точку облучения при $I_p=10^{-7}$ А, $E_p=25$ кэВ и времени облучения $t_1=1$ (1), $t_2=5$ (2) (в).
А — $t_1=1$, Б — $t_2=10$ с.

мумами всегда наблюдалось плато и расстояние между экстремумами профиля наведенного тока было меньше, чем для кристаллов n -типа. Следует также отметить, что в кристаллах p -типа до облучения наблюдались барьеры на малоугловых границах зерен (МУГ) (рис. 3, а), которые быстро уменьшались уже при облучении в течение 1 с ($E_p=25$ кэВ, $I_p=10^{-7}$ А) (рис. 3, а, А). Вблизи некоторых границ повышалась скорость формирования потенциальных барьеров.

Для объяснения полученных результатов необходимо предположить, что уже при малых временах облучения в некоторой области, примыкающей к точке падения электронного пучка, увеличивается концентрация акцепторных центров и формируются гетеропереходы. Акцепторные центры определяют формирование области с другим типом проводимости в кристаллах n -типа, а формирование области более широкозонного материала определяет появление наведенного тока в образцах p -типа, при этом направление тока соответствует изотипному гетеропереходу с разрывом валентной зоны [5]. В принципе это легко объ-

яснить, учитывая наблюдавшееся в целом ряде работ обеднение поверхности ртути под воздействием электронного пучка [1-4] и акцепторным действием катионных вакансий [6]. При обеднении поверхностных слоев ртутью они являются источником катионных вакансий, диффундирующих в глубь кристалла и стимулирующих диффузию ртути и кадмия, что и приводит к формированию области *p*-типа и области более широкозонного материала. Особое внимание следует обратить на различие в профилях наведенного тока, наблюдаемых на образцах *p*- и *n*-типа при малых временах облучения, т. е. на наличие плато в образцах *p*-типа. Наличие плато в профиле наведенного тока показывает, что гетеропереход расположен на глубине, превышающей глубину проникновения электронов (несколько мкм). В то же время в образцах *n*-типа плато отсутствует, что может быть связано с большей диффузионной длиной неосновных носителей заряда в материале *p*-типа, однако, по нашему мнению, более вероятное объяснение связано с тем, что граница образующейся при облучении *p*-области расположена на глубине менее 1 мкм. Таким образом, ширина *p*-области больше ширины области с большим x , однако ее толщина меньше толщины слоя более широкозонного материала.

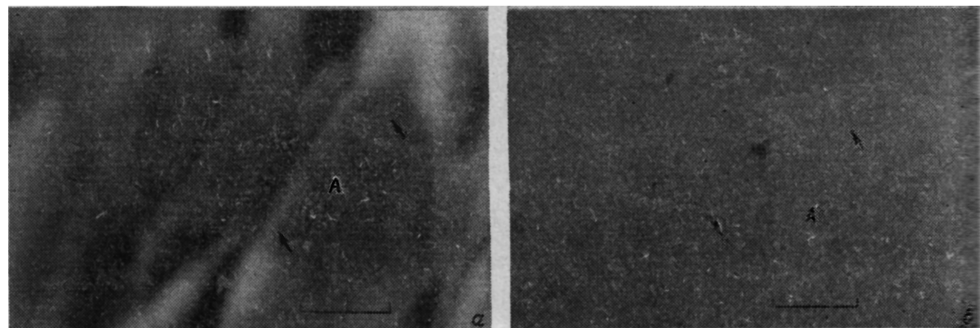


Рис. 3. Изображения малоугловых границ зерен в $p\text{-Cd}_{0.4}\text{Hg}_{0.6}\text{Te}$ в режиме наведенного тока (а) и соответствующего участка кристалла в режиме вторичной электронной эмиссии (б) А — область с уменьшенным потенциальным барьером на границе зерен после воздействия электронного пучка ($I_p=10^{-7}$ А, $E_p=25$ кэВ, $t=1$ с).

Естественно возникает вопрос о механизмах, определяющих наблюдаемые изменения. Проведенные нами исследования показали, что в отличие от [4] уменьшение тока пучка до 10^{-8} А даже при соответствующем увеличении времени облучения не приводит к заметным изменениям электрических свойств приповерхностных областей, т. е. наблюдаемые эффекты не определяются дозой облучения, что характерно для электронно-стимулированных процессов. Проведенные нами оценки согласно выражению [7]

$$\Delta T = T_m - T_s = I_p E_p / [(8\pi)^{1/2} K_s d_p], \quad (1)$$

где T_m — максимальная температура поверхности в центре пучка, T_s — температура подложки, I_p и E_p — ток и энергия пучка соответственно, d_p — диаметр пучка, K_s — коэффициент теплопроводности, показали, что в используемых нами условиях перегрев поверхности хотя и не превышает 300° , но может быть весьма значительным. С учетом того, что нагрев образцов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ уже до $200-200^\circ\text{C}$ приводит к обеднению их ртутью, наблюдаемые нами изменения можно было бы объяснить термостимулированными процессами. Однако, во-первых, этому противоречит достаточно большая ширина областей с измененными свойствами (несколько десятков мкм), что существенно превышает известные диффузионные длины для ртути. Во-вторых, несмотря на то что при охлаждении образцов до 100 К в процессе облучения мы наблюдали некоторое уменьшение размеров областей, выявляемых методом наведенного тока, основные характеристики не изменялись, что никак нельзя объяснить в рамках термостимулированных механизмов. Таким образом, в формировании обнаружен-

ных изменений электрических свойств приповерхностных слоев кристалла $Cd_xHg_{1-x}Te$, по-видимому, принимают участие как электронно-, так и термо-стимулированные процессы. Влияние малоугловых границ на наблюдаемые изменения свидетельствует также и о влиянии дефектной структуры исходного кристалла, в частности включений второй фазы, на процессы, происходящие при воздействии низкоэнергетичного электронного пучка.

При увеличении времени облучения включаются новые механизмы, которые приводят к инверсии контраста в образцах p -типа, при этом знак наведенного тока начинает соответствовать случаю образования области n -типа проводимости. Контраст такого же знака был получен нами в случае локального нагрева при расплавлении электронным пучком кусочка In на поверхности образца. Образование слоя n -типа наблюдалось также в [8] при воздействии лазерного пучка, что объяснялось диффузией междоузельной ртути в глубь кристалла. При этом необходимо предположить, что на поверхности существует барьер для испарения ртути. В случае нагрева образца кусочком индия роль барьера может играть индий. При длительном воздействии на поверхности может формироваться нарушенный слой, препятствующий дальнейшей десорбции ртути, однако, по нашему мнению, нужно также учитывать возможность диффузии примесей донорного типа из объема кристалла аналогично наблюдавшейся в [9] диффузии серебра к поверхности при освещении кристалла. Для ответа на этот вопрос необходимы дополнительные эксперименты.

Таким образом, в работе обнаружено и изучено влияние электронов подпороговой энергии на электрические свойства кристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$ p - и n -типа проводимости в зависимости от условий облучения. Показано, что в формировании свойств областей, прилегающих к облучаемой области, принимает участие несколько механизмов, для выяснения которых необходимы дальнейшие исследования.

Список литературы

- [1] Бондаренко И. Е., Панин Г. Н., Якимов Е. Б. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1988. Т. 52. В. 7. С. 1380—1382.
- [2] Nitz H. M., Ganschow O., Kaiser V., Wiedmann L., Benninghoven A. // Surf. Sci. 1981. V. 104. P. 365—383.
- [3] Shih C. K., Friedman D. J., Bertness K. A., Lindau I., Spicer W. E., Wilson J. A. // J. Vac. Sci. Techn. 1986. V. A4 (4). P. 1997—2001.
- [4] Запорожченко В. И., Кулешов В. Ф., Омеляновская Н. М., Покровский А. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1985. Т. 49. В. 9. С. 1695—1699.
- [5] Grant R. W., Kraut E. A., Chenng J. T., Kowaleryk S. P. // J. Vac. Sci. Techn. 1987. V. A5 (5). P. 3070—3073.
- [6] Reine M. B., Scod A. K., Tredwell T. J. // Semiconductors a. Semimetals / Ed. by R. K. Willardson, A. C. Beer. N. Y., 1981. V. 18. P. 388.
- [7] Iranmanesh A., Pease R. W. // J. Vac. Sci. Techn. 1983. V. B1 (1). P. 91—95.
- [8] Moore F. G., Kremer R. E. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 52. N 16. P. 1314—1316.
- [9] Tregilgas J., Gnade B. // J. Vac. Sci. Techn. 1985. V. A3 (1). P. 156—159.

Институт проблем технологии микроэлектроники
и особочистых материалов АН СССР
Черноголовка

Получена 4.01.1989
Принята к печати 9.03.1989