

скую форму; с увеличением размеров капли приобретает плоскую форму. Распределение капель по размерам описывается функцией типа

$$\Delta n = cD_k^\gamma,$$

Δn , D_k — количество и диаметр капель; c , γ — постоянные, зависящие от давления газа в объеме и угловой координаты.

Проведенные исследования позволяют сделать выводы, что при эрозии микропятнами катодов с пористостью 8—10 % стационарной вакуумной дуги угол разлета микрокапельной фазы достигает 360° на поверхности катода. В парах порошкового катода с данной пористостью происходит частичная кристаллизация жидкой фазы, которая приводит к уменьшению количества микрокапель в объеме конденсата в 2 раза в сравнении с эрозией литых катодов.

Литература

- [1] Немчинский В. А. ЖТФ, 1979, т. 49, № 7, с. 1379—1384.
- [2] Мойжес В. Я., Немчинский В. А. ЖТФ, 1984, т. 54, № 1, с. 13—18.
- [3] Аксенов И. И. и др. ЖТФ, 1984, т. 54, № 8, с. 1530—1534.
- [4] Мойжес В. Я., Немчинский В. А. ЖТФ, 1980, т. 50, № 1, с. 78—86.
- [5] Еккер. В кн.: Вакуумные дуги. Теория и приложения. М.: Мир, 1982. 269 с.
- [6] Любимов Г. А., Раховский В. И. УФН, 1978, т. 125, № 4, с. 665—703.

Пермский политехнический институт
Республиканский инженерно-технический
центр порошковой металлургии

Поступило в Редакцию
15 апреля 1987 г.
В окончательной редакции
8 февраля 1988 г.

УДК 537.311.331

Журнал технической физики, т. 58, в. 8, 1988

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ InSb, ПОДВЕРГНУТОГО ЛАЗЕРНОМУ ОТЖИГУ В СРЕДЕ ЖИДКОГО АЗОТА

Г. Г. Громов, А. Вернер, К. В. Руденко, В. А. Семенюк, В. Б. Уфимцев

Ранее в работе [1] сообщалось о наносекундном лазерном отжиге ($\lambda = 1.064$ мкм, $\tau = 10$ нс) антимонида индия в среде жидкого азота, приводящем к увеличению коэффициента отражения облученной поверхности R до 56 %. Причем в послеимпульсный период выдержки образцов в нормальных условиях происходила полная релаксация R до значения $R_{\text{InSb}} = 46.2$ % ($\lambda = 0.63$ мкм). В ряде работ, например [2, 3], также наблюдался рост коэффициента отражения поверхности полупроводников (Si, GaAs, InP) после короткоимпульсного лазерного отжига, что было связано с аморфизацией поверхностного слоя.

По аналогии с данными работами можно предположить, что при лазерном отжиге InSb в жидком азоте также происходит структурное превращение. Однако ряд наблюдающихся особенностей высокоотражающей фазы на InSb (несвойственная для аморфного InSb нестабильность) требует проведения дальнейших исследований.

Для детального изучения особенностей релаксации высокоотражающей фазы в настоящей работе методика измерения динамики R [1] дополнена термостатированием образца в послеимпульсный период времени в инертной среде (Ar) при различных температурах для определения температурной зависимости скорости релаксации. Кроме того, исследовалось изменение удельной плотности в слое отожженного InSb, для чего применен метод профилометрии поверхности (профилометр TALLYSTEP фирмы «TAYLOR—HOBSON» с высоким разрешением ~ 10 Å). Изучались изменение профиля поверхности InSb, отожженного в жидком азоте при различных плотностях энергии лазерного воздействия, а также его динамика в послеимпульсный период в сопоставлении с релаксацией R . Для определения толщины поверхностной области, претерпевшей фазовое превращение, применялся метод селективного химического травления отожженного InSb до полного удаления высокоотражающей фазы, что контролировалось по изменению R (схема метода аналогична [4]) с последующей профилометрией.

Изучение релаксации высокоотражающей фазы при различных температурах термостабилизации показало существенную температурную зависимость ее устойчивости. На рис. 1 представлена зависимость времени релаксации $\tau_{\text{ре}}$ от температуры T в координатах $\ln \tau_{\text{ре}} - T^{-1}$. Интересным представляется тот факт, что экспериментальные значения (1) с достаточной точностью аппроксимируются линейной зависимостью (2). Известно, что такая зависимость характерна для термически активируемых процессов и позволяет вычислить энергию активации $E_{\text{акт}}$. Полученная в нашем случае величина $E_{\text{акт}} = 1.48$ эВ (согласно данным рис. 1).

В связи с тем что структурные превращения сопровождаются изменением плотности ρ вещества, представляет интерес измерение величины данного эффекта в нашем случае.

На рис. 2, а представлен профиль поверхности InSb, облученного в жидком азоте через маску в виде круглого отверстия, плотно прижимаемую к поверхности. Профили поверхности записывались сразу после отжига ($P = 0.15$ Дж/см²). Как видно из рис. 2, а, в результате отжига происходит образование ступеньки на границе облученной и необлученной областей на величину до $\Delta h = 100 \div 150$ Å (кривизна линий необлученной поверхности и дна облученной объясняется особенностью профилометра). В послепульсный период времени после полной релаксации коэффициента отражения наблюдалось соответствующее уменьшение Δh ступеньки

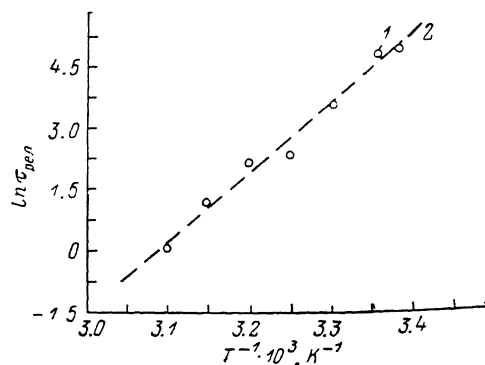


Рис. 1.

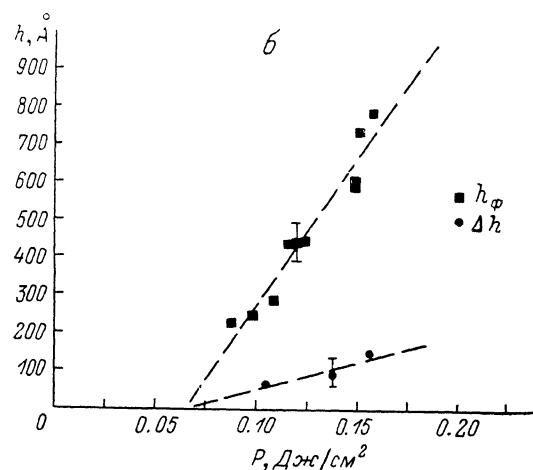
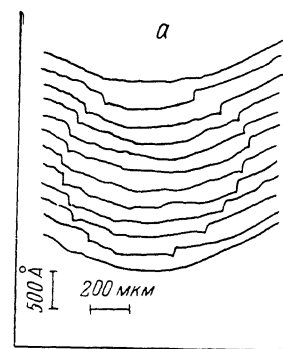


Рис. 2.

вплоть до восстановления планарности поверхности. Таким образом, имеет место обратимое изменение (увеличение) плотности ρ антимолида индия в результате отжига в среде жидкого азота.

На рис. 2, б представлена суммарная зависимость Δh , измеренной непосредственно после отжига, от плотности энергии P лазерного воздействия. Здесь же представлена зависимость толщины слоя высокоотражающей фазы h_{ϕ} , измеренной по методу контролируемого травления последующей профилометрии. Сопоставляя величины Δh и h_{ϕ} для фиксированной P , можно оценить величину скачка плотности $\Delta \rho / \rho$ в результате фазового превращения $\Delta \rho / \rho = \Delta h / h_{\phi}$. Согласно данным рис. 2, б (с учетом погрешности методики), $\Delta \rho / \rho = 19 \pm 3.5\%$. Если плотность исходного InSb составляет $\rho_{\text{кр}} = 5.775$ г/см³, то плотность слоя, претерпевшего фазовое превращение, должна, таким образом, составлять 6.9 ± 0.2 г/см³.

Сопоставление с известными данными по плотности фаз антимолида индия показывает, что измеренная в работе плотность высокоотражающей фазы существенно больше, чем у аморфного InSb ($\rho_a = 5.3 \pm 0.5$ г/см³ [5]). Причем в случае образования аморфного слоя не должно было бы наблюдаться ступеньки на границе облученной и необлученной областей (рис. 2, а), так как $\rho_a \leq \rho_{\text{кр}}$.

С другой стороны, плотность образующейся высокоотражающей фазы близка к плотности металлических фаз антимолида индия ($\rho_{\text{ромс}} = 7.25$, $\rho_{(\beta\text{-Sn})} = 6.92$, $\rho_{(\text{NaCl})} = 6.85$ г/см³ [6]).

Более того, отделившиеся металлические фазы антимонида индия проявляют метастабильную устойчивость вплоть до комнатных температур ($T=288$ К [7]), что хорошо согласуется с установленной температурной устойчивостью высокоотражающей фазы, образующейся при лазерном отжиге в жидком азоте (рис. 1).

В заключение следует отметить, что эффекта образования высокоотражающей фазы в отличие от случая жидкого азота не наблюдалось при аналогичных параметрах наносекундного отжига InSb в нормальных условиях ($T=298$ К), а также при увеличении длительности импульса до 100 нс и более (70 мкс) в среде жидкого азота.

Литература

- [1] Громов Г. Г., Руденко К. В., Уфимцев В. Б. ЖТФ, 1986, т. 56, № 10, с. 1998—2000.
- [2] Алферов Ж. И., Арутюнов Е. Н., Васильев А. Н. и др. Письма в ЖТФ, 1985, т. 14, № 15, с. 916—920.
- [3] Liu P. L., Yen R., Bloembergen N., Hodgson R. T. Appl. Phys. Lett., 1979, v. 34, N 12, p. 864—866.
- [4] Громов Г. Г., Давыдов А. В., Уфимцев В. Б. Электронная техника. Материалы, 1982, № 11, с. 62—64.
- [5] Stuke J., Zimmerer G. Phys. Stat. Solidi (B), 1972, v. 49, N 513, p. 513—523.
- [6] Петросян В. И., Васин О. И., Стенин С. И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1977, т. 26, № 1, с. 10—13.
- [7] Дегтярева В. Ф., Белаш И. Т., Чипенко Г. В. и др. ФТТ, 1983, т. 25, № 10, с. 2968—2974.

Московский институт
тонкой химической технологии
им. М. В. Ломоносова

Поступило в Редакцию
25 мая 1987 г.

УДК 537.311.33

Журнал технической физики, т. 58, в. 8, 1988

НЕРАВНОВЕСНАЯ ГРАДИЕНТНО-ЗОННАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ (НГЗК) В ПОЛУПРОВОДНИКЕ

Б. С. Евсеев

В последнее время большое развитие получили исследования разновидностей зонной плавки (кристаллизации), впервые обнаруженной и рассмотренной Пфанном [1, 2], в том числе зонной перекристаллизации градиентом температуры [3], электрожидкостной эпитаксии [4, 5], электромиграции расплавленных зон на поверхности и в объеме полупроводника [6] и др. Общей особенностью этих процессов является сравнительно большая протяженность зон в направлении их движения (минимальные протяженности превышают десятки микрометров) и малая скорость их движения (скорости движения минимальных зон обычно не превышают 10^{-4} см/с). Это позволяет вполне корректно описывать эти процессы (как стационарные, так и нестационарные) в рамках классической (равновесной) термодинамики.

В настоящей работе представлена теория НГЗК в полупроводнике. В основе НГЗК лежит процесс формирования мобильного жидкофазного домена (ЖФД) в твердофазной области (ТФО) и транспорт его через полупроводник. Формирование ЖФД при НГЗК происходит известным способом [7-9] и аналогично формированию неравновесной электронной системы при лазерно-инжекционном отжиге (ЛИО) [10-12], а именно путем последовательного поглощения коротковолнового ($\hbar\omega > E_g$) и длинноволнового ($\hbar\omega < E_g$) лазерных излучений. Транспорт ЖФД через полупроводник осуществляется электрическим полем, возбуждаемым в структуре ТФО—ЖФД—ТФО электронным и ионным зондами, аналогично транспорту фотогенерированных носителей при ЛИО в продольном электрическом поле [12]. Поток излучения I_1 ($\hbar\omega > E_g$) формирует на одной стороне полупроводникового кристалла жидкую фазу. Со стороны другой поверхности полупроводник облучается потоком излучения I_0 ($\hbar\omega < E_g$), для которого кристалл почти прозрачен. Поток I_0 поглощается в жидкой фазе на некоторой глубине, которая и определяет начальную протяженность ЖФД вдоль направления оптического волнового вектора. Область ЖФД везде, за исключением границ, электронейтральна и имеет структуру электронного расплава (в монокристаллических полупровод-