

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В InSb ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Г.Г.Громов, В.В.Капаев, Ю.В.Капаев, К.В.Руденко

Экспериментально исследованы неравновесные фазовые переходы (ФП) в антимониде индия. Предложена модель механизма ФП.

Возможность неравновесных ФП при воздействии на полупроводник сильного электромагнитного (лазерного) излучения ранее установлена теоретически ¹, что требует экспериментальной проверки.

Выбор полупроводника (InSb) связан с возможностью стабилизации неравновесных (металлических) фаз InSb быстрой закалкой до низких температур ². В соответствии с этим лазерное воздействие ($\lambda = 1,064$ мкм, $\tau = 10$ нс) осуществлялось на образцы, помещенные в жидкий азот. Образцами являлись монокристаллические подложки InSb, а также поликристаллические пленки.

Экспериментальные исследования показали, что начиная с энергии импульса $P = 0,06$ Дж/см², происходит образование слоя высокоотражающей фазы. При этом зависимость коэффициента отражения $R(\lambda = 0,63$ мкм) от P имеет характерный вид (рис. 1), обусловленный изменением толщины h слоя фазы. Величина h , измеренная путем контролируемого травления с последующей профилометрией поверхности, линейно зависит от P (рис. 2, а). Следует отметить, что

образование высокоотражающей фазы начинается с энергий, существенно меньших расчетного порога плавления в жидком азоте ($P_{\text{пл}}^{\text{расч}} = 0,095 \text{ Дж/см}^2$).

При выдержке облученных образцов в нормальных условиях происходит обратный переход, сопровождающийся уменьшением R вплоть до исходного значения (46%). При этом наблюдается сильная температурная ($T = 288 - 333 \text{ К}$) зависимость времени релаксации фазы $\tau_{\text{рел}}$, которая имеет характерный для термически активируемых процессов вид $\ln \tau_{\text{рел}} = -52,6 + 1,7 \times 10^4 / T$ ($\tau_{\text{рел}}$ в мин).

Данные рентгеноструктурного анализа (по методу Дебая) на поликристаллических пленках показывают, что метастабильной высокоотражающей фазой является металлическая фаза InSb (по-видимому типа "β-Sn"), согласно соответствию найденных межплоскостных расстояний ($d = 2,92; 2,56; 2,04 \text{ \AA}$) известным данным². При этом установлено характерное для ФП InSb типа "сфалерит-металлическая фаза" увеличение плотности ($\Delta \rho = 20\%³$), о чем свидетельствует обратимое изменение планарности первоначально гладкой поверхности, заключающееся в "проваливании" облученного участка на величину Δh (рис. 2, б). Сопоставление Δh с толщиной образующейся фазы (рис. 2) позволяет вычислить ее плотность $\rho = 6,9 \pm 0,2 \text{ г/см}^3$.

Важной особенностью является то, что ФП InSb происходит через промежуточное состояние. При воздействии серией импульсов (N) на зависимости R от N (по дискретной шкале N) образованию высокоотражающей фазы ($N > 1$) всегда предшествует ($N = 1$) состояние с пониженным R относительно исходного ($\Delta R = 4 \div 5\%$). При этом данные рентгеноструктурных исследований позволяют по наличию сильного рефлекса $d = 3,46 \text{ \AA}$ предположить образование вюрцитной модификации InSb.

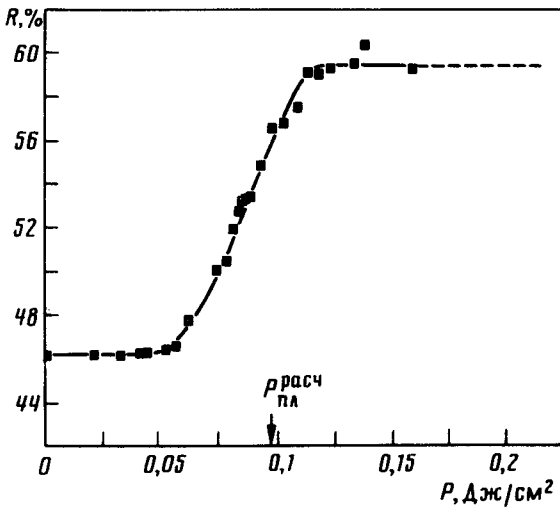


Рис. 1

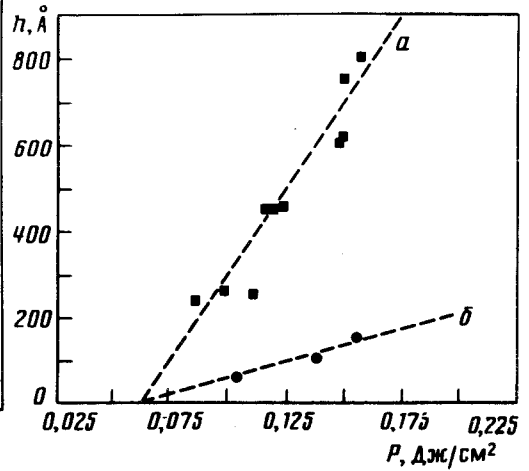


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения $R(\lambda = 0,63 \text{ мкм})$ облученной поверхности InSb от энергии импульса p

Рис. 2. Результаты профилометрии облученной поверхности: a – толщина высокоотражающей фазы, b – величина "провала" облученного участка поверхности, Δh

На основе метода псевдопотенциалов¹ показано, что для нетеплового механизма фазового перехода⁴ в InSb из основного полупроводникового состояния со структурой сфалерита (фаза I) в металлическое состояние типа "β-Sn" (фаза III) требуется концентрация носителей $n_{\text{кр}} \approx (2 \div 3) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, что в $5 \div 10$ раз превышает значение, достигаемое в эксперименте. В этих условиях ФП может происходить за счет увеличения концентрации возбуждений в отдельных областях до $n_{\text{кр}}$ по сравнению со средней n , по аналогии с ситуацией в электронно-ды-

рочных каплях ^{5,6}. В условиях данного эксперимента ($n \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$) возбуждения можно считать идеальным газом, а причиной их конденсации в новую фазу является изменение ширины запрещенной зоны E_g , зависящей от n ($E_g = E_g^0 (1 - \gamma n)$), и приведенной массы m . Термодинамическое описание такого перехода возможно, если время жизни возбуждений в обеих фазах больше времени ФП. Это не выполняется для металлической фазы III. Однако, как показано выше, ФП идет через промежуточную полупроводниковую вюрцитную фазу II. Для каждой из фаз ($i = I, II$) энергия E_i возбуждений имеет вид $E_i = A(n^{5/3}/m_i) + BnE_{gi}^0 (1 - \gamma n)$. Величина $\delta E = \Delta E_T + (E_{II} - E_I)$ (где ΔE_T — равновесная разница в энергиях фаз II и I) характеризует возможность ФП. В случае $E_{gII}^0 < E_{gI}^0$ эта разность имеет минимум, как и энергия электронно-дырочных капель. В InSb ситуация, по-видимому, обратная ($E_{gII}^0 > E_{gI}^0$). Величина δE с ростом n растет, проходит через максимум и затем монотонно убывает. Выбирая в разумных пределах (пока экспериментально неизвестные) значения E_g , m , γ для фазы II, получаем $n_{max} \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Если средняя концентрация $n > n_{max}$, то система имеет тенденцию к конденсации возбуждений в полоски фазы II, периодически расположенные в максимумах электромагнитного поля. Рост концентрации в них ограничивается переключением при $n > n_{кр}$ в метастабильное (при $n=0$) металлическое состояние III. В величине δE для неоднородного состояния n для фаз I и II различны.

Для выяснения вопроса о дальнейшей эволюции системы решалась электродинамическая задача о проникновении излучения в периодическую структуру, состоящую из прослоек металла шириной a на поверхности полупроводника. Максимум потока P_{max} , проникающего в структуру, находится в полупроводниковой области вблизи границы с металлом. При $a/d < 0,4$ величина P_{max} превышает значение P_s в случае однородной полупроводниковой поверхности (P_{max}/P_s может достигать 1,5), что обеспечивает рост металлической прослойки. В силу метастабильности металлического состояния, величина a будет увеличиваться. Стабилизирующим металлическое состояние фактором является то, что поток излучения, проникающего в металлические прослойки P_m , существенно превышает значение P_0 для однородной металлической поверхности (при малом a $P_m/P_0 \cong 2$).

При $a > 0,4$ появляются дополнительные максимумы потока в центре полупроводниковой области, что приведет к образованию и там металлической фазы.

Таким образом, рассмотренным механизмом приведет к тому, что объем металлической фазы будет существенно превышать величину, равную отношению средней концентрации носителей в образце к критической для перехода в металлическое состояние.

Литература

1. Конаев Ю.В., Меньяйленко В.В., Молотков С.Н. ФТТ, 1985, 27, 3288.
2. Деятарева В.Ф., Белааш И.Т., Чипенко Г.В., Понятовский Е.Г., Ращупкин В.И. ФТТ, 1983, 25, 2968.
3. Петросян В.И., Васин О.И., Стенин С.И., Бондаренко Н.Ф., Скрипкин П.А. Письма в ЖЭТФ, 1977, 26, 10.
4. Конаев В.В., Конаев Ю.В., Молотков С.Н. Микроволновая электроника, 1983, 12, 499.
5. Тиходеев С.Г. УФН, 1985, 145, 3.
6. Keldysh L. V. In: Pros. of 9-th Intern. Conf. on Physics of Semiconductors — L: Nauka, 1968, p. 1307.