

ГЛУБОКИЙ РАДИАЦИОННЫЙ УРОВЕНЬ В АНТИМОНИДЕ ИНДИЯ n -ТИПА, ОБЛУЧЕННОМ ЭЛЕКТРОНАМИ

Дмитриев В. В., Скипетров Е. П.

Исследованы гальваномагнитные эффекты в слабых магнитных полях в нелегированных образцах n -InSb [$n=(3\div 5)\cdot 10^{14}$ см $^{-3}$], облученных электронами ($T\approx 300$ К, $E=4\div 8$ МэВ, $\Phi \leq 2\cdot 10^{17}$ см $^{-2}$), в интервале давлений $P \leq 15$ кбар. В облученных образцах вблизи дна зоны проводимости обнаружено появление глубокого уровня с энергией $E_f \approx E_c - 0.05$ эВ. Установлено, что под действием давления происходят увеличение энергии активации глубокого уровня E_f и n - p -конверсия при низких температурах, связанные с неизменностью энергетического положения уровня E_f относительно потолка валентной зоны антимонида индия. Сопоставление полученных результатов с данными других работ позволило заключить, что электронное облучение антимонида индия приводит к возникновению вблизи дна зоны проводимости трех глубоких уровней, отщепленных, по-видимому, от потолка валентной зоны.

Введение. Известно, что облучение антимонида индия быстрыми электронами приводит к образованию целого ряда радиационных дефектов (простейших дефектов в подрешетках индия и сурьмы, их комплексов с атомами примеси, областей разупорядочения и т. д.) и возникновению серии глубоких уровней в пределах запрещенной зоны [1]. В частности, в работах [2-3] регистрировалось появление локальных уровней вблизи дна зоны проводимости в интервале энергий $E_c - (0.03\div 0.1)$ эВ. Точное энергетическое положение этих уровней и их природа вплоть до настоящего времени не определены, так как в литературе имеются разноречивые сведения по данным вопросам: в работах [2, 3] указывалось на появление при низкотемпературном электронном облучении кристаллов InSb группы акцепторных уровней с энергиями $E_c - (0.03\div 0.1)$ эВ; при высокотемпературном электронном облучении n - и p -InSb отмечалось появление глубокого акцепторного уровня с энергией $E_c - 0.05$ эВ, связанного с возникновением комплексов междоузельных атомов индия с атомами неконтролируемой примеси (кислорода) [4-6], а также уровней с энергиями $E_c - 0.03$ и $E_c - 0.06$ эВ [7-9]. Кроме того, неясно, идет ли в перечисленных работах речь об одном и том же глубоком уровне или электронное облучение вызывает появление в указанном диапазоне энергий нескольких различных локальных уровней.

Исследование гальваномагнитных явлений под давлением является в настоящее время одним из перспективных методов изучения энергетического спектра радиационных дефектов в узкозонных полупроводниках. Гидростатическое сжатие облученных кристаллов позволяет изменять положение радиационных уровней относительно краев энергетических зон и получать дополнительную информацию об энергетическом положении и природе уровней. Ранее нами исследовано влияние давления на электрофизические свойства облученных электронами кристаллов p -InSb, легированных германием [8], и установлено, что положение глубоких радиационных уровней $E_{f1} \approx E_c - 0.03$ эВ, $E_{f2} \approx E_c - 0.06$ эВ относительно потолка валентной зоны антимонида индия не зависит от давления. В настоящей работе исследовано влияние давления на гальваномагнитные эффекты в нелегированных кристаллах n -InSb, облучен-

ных электронами. В облученных образцах определены энергетическое положение глубокого радиационного уровня E_i и характер его движения относительно краев разрешенных зон под давлением.

1. Методика измерений и образцы

Нелегированные образцы антимонида индия n -типа с концентрациями электронов $n = (3 \div 5) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ облучались при $T \approx 300 \text{ К}$ потоками быстрых электронов $\Phi \leq 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ с энергиями $E = 4 \div 8 \text{ МэВ}$. У каждого образца до и после облучения измерялись температурные зависимости удельного сопротивления ρ и коэффициента Холла R_H ($4.2 \leq T \leq 300 \text{ К}$, $B \leq 0.04 \text{ Т}$). Облученные образцы исследовались затем в условиях гидростатического сжатия при давлениях $P \leq 15 \text{ кбар}$. Методики подготовки образцов к измерениям, а также создания и измерения давления приведены в [8].

2. Результаты измерений

Исходные образцы имели высокую концентрацию электронов, поэтому в области низких температур коэффициент Холла не зависел от температуры, а температурные зависимости удельного сопротивления имели металлический

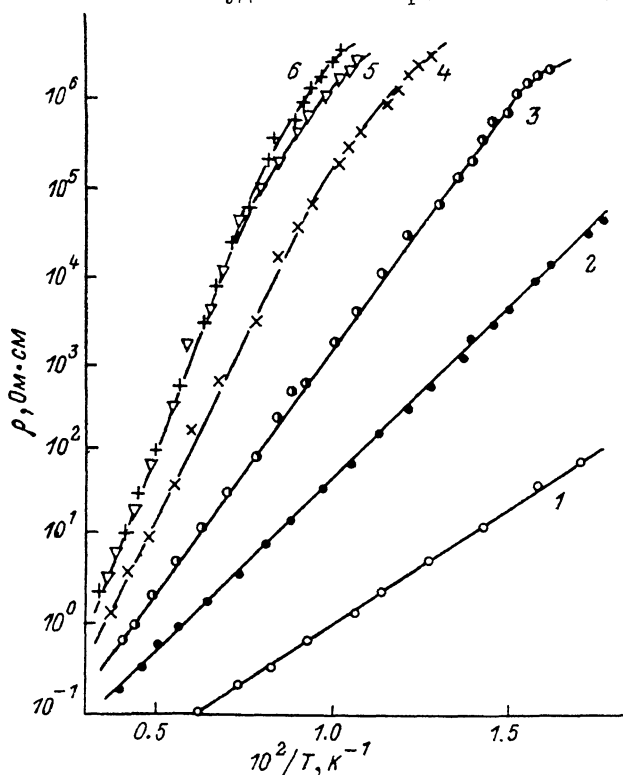


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления образца n -InSb, облученного электронами ($\Phi = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$), при разных давлениях.

P , кбар: 1 — 0, 2 — 1.7, 3 — 4.4, 4 — 7.7, 5 — 11.1, 6 — 13.7.

характер. При облучении электронами происходит увеличение удельного сопротивления и абсолютной величины коэффициента Холла, указывающее на понижение концентрации электронов в образцах и компенсирующее действие вводимых при облучении дефектов [7]. При потоках облучения $\Phi \geq 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ на температурных зависимостях удельного сопротивления и коэффициента Холла появляются активационные участки, соответствующие возникновению глубокого уровня E_i вблизи дна зоны проводимости антимо-

нида индия (рис. 1, 2). Энергия активации уровня, определенная по углу наклона зависимостей $\rho(1/T)$, $R_X(1/T)$, составляет $\Delta E_i = E_c - E_i \approx 0.05$ эВ.

Под действием давления наклон активационных участков на зависимостях $\rho(1/T)$, $R_X(1/T)$ монотонно увеличивается вплоть до некоторого критического давления $P' \approx 10$ кбар. При этом же давлении на температурных зависимостях

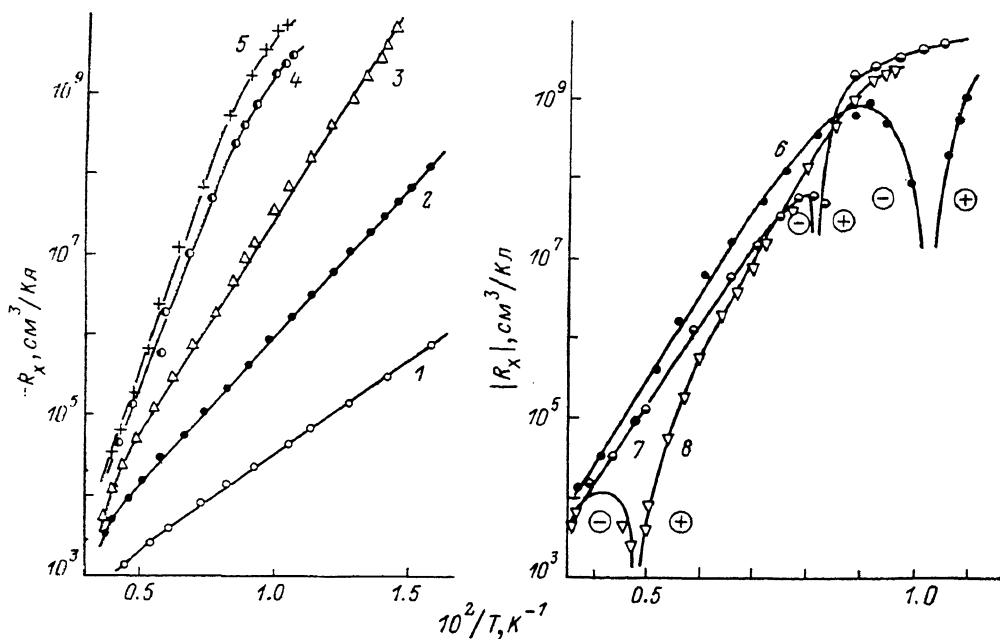


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента Холла образца n -InSb, облученного электронами ($\Phi = 2 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$), при разных давлениях.

P , кбар: 1 — 0, 2 — 1.7, 3 — 4.4, 4 — 7.7, 5 — 8.8, 6 — 11.1, 7 — 12.2, 8 — 13.7.

коэффициента Холла появляется точка инверсии знака коэффициента Холла (рис. 2). В интервале давлений $P > P'$ зависимости $\rho(1/T)$ изменяются незначительно, а наклон активационного участка практически не зависит от давления. Коэффициент Холла в области низких температур имеет положительный знак, а при увеличении температуры инвертирует. С ростом давления точка инверсии знака R_X смещается в сторону высоких температур.

3. Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют об увеличении энергии активации глубокого уровня E_i под действием давления. Зависимость энергии активации уровня ΔE_i , рассчитанной по углу наклона зависимостей $\rho(1/T)$, от давления представлена на рис. 3. На этом же рисунке для сравнения приведены аналогичные зависимости для энергий активации глубоких уровней E_{i1} , E_{i2} , обнаруженных в облученных электронами кристаллах p -InSb<Ge> [8]. Сопоставление полученных экспериментальных результатов с данными работы [8] позволяет сделать следующие выводы.

1) Так же как и для локальных уровней E_{i1} , E_{i2} , в области давлений ниже критического давления P' энергия активации глубокого уровня E_i увеличивается под давлением со скоростью $d\Delta E_i/dP \approx 15$ мэВ/кбар, совпадающей с барическим коэффициентом ширины запрещенной зоны антимолида индия [10]. Поэтому при увеличении давления положение уровня E_i относительно потолка валентной зоны не меняется и при давлениях $P > P'$ он попадает в нижнюю половину запрещенной зоны. При этом величина энергии активации ΔE_i достигает максимального значения $\Delta E_{i,max} = E_i - E_v = (195 \pm 5)$ мэВ и определяется расстоянием от потолка валентной зоны до локального уровня. При увеличении температуры происходит термическая активация электронов из валентной зоны на

уровень E_i и коэффициент Холла в области низких температур имеет положительный знак. И только при переходе в область собственной ионизации наблюдается инверсия знака коэффициента Холла, типичная для кристаллов p -InSb (рис. 2).

2) Экспериментально определенные параметры, характеризующие энергетическое положение глубоких уровней E_i , E_{i1} , E_{i2} (энергия активации при атмосферном давлении, максимальное значение энергии активации, критическое давление P'), существенно различаются. Это обстоятельство позволяет утверждать, что электронное облучение антимионида индия приводит к возникновению вблизи

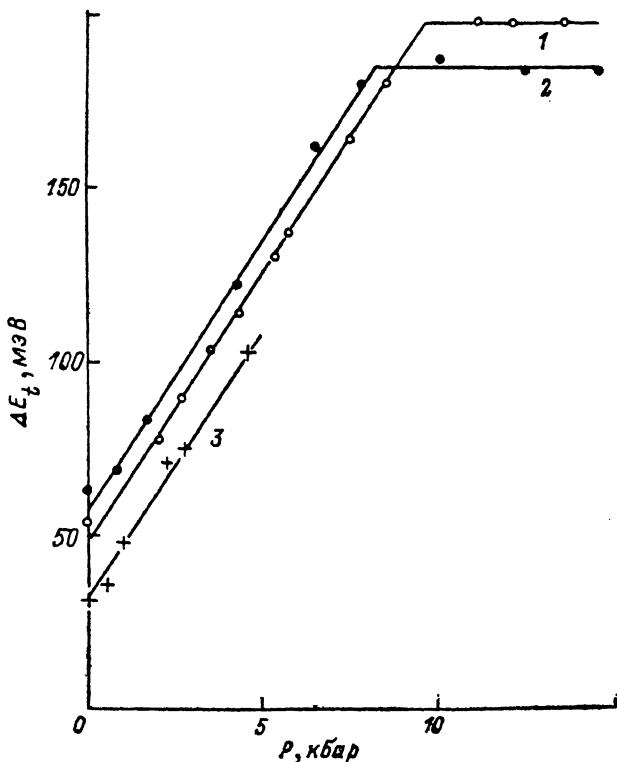


Рис. 3. Зависимости энергий активации глубоких радиационных уровней от давления для образцов n -InSb (1) и p -InSb<Ge> (2, 3), облученных электронами.

1 — ΔE_{i1} , 2 — ΔE_{i2} , 3 — ΔE_{i3} .

дна зоны проводимости трех различных глубоких уровней. Инверсия типа проводимости в облученных образцах и неизменность положения уровней относительно потолка валентной зоны под давлением свидетельствуют, на наш взгляд, об акцепторной природе этих уровней, отщепленных, по-видимому, от потолка валентной зоны антимионида индия.

Заключение. Таким образом, облучение антимионида индия быстрыми электронами приводит к возникновению вблизи дна зоны проводимости трех различных глубоких уровней. Положение этих уровней относительно потолка валентной зоны не изменяется под действием давления. Параметры уровней E_i , E_{i1} , E_{i2} близки к параметрам уровня M_1 , обнаруженного в работах [4-6], что позволяет связывать по крайней мере один из них (скорее всего E_i) с комплексами междоузельных атомов индия с атомами кислорода.

Список литературы

- [1] Заитов Ф. А., Исаев Ф. К., Поляков А. Я., Кузьмин А. В. Влияние проникающей радиации на свойства антимионида и арсенида индия. Баку, 1984. 205 с.
- [2] Aukerman L. W. // Phys. Rev. 1959. V. 115. N 5. P. 1125—1132.
- [3] Eisen F. H. // Phys. Rev. 1966. V. 148. N 2. P. 828—838.

- [4] Зайтов Ф. А., Поляков А. Я. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 9. С. 1782—1788.
- [5] Зайтов Ф. А., Горшкова О. В., Поляков А. Я., Кеворков М. Н., Попков А. Н. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 6. С. 1230—1232.
- [6] Зайтов Ф. А., Горшкова О. В., Поляков А. Я., Кеворков М. Н., Попков А. Н., Хлыстовская М. Д. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1982. Т. 18. В. 1. С. 8—11.
- [7] Скипетров Е. П., Дмитриев В. В., Зайтов Ф. А., Кольцов Г. И., Ладыгин Е. А. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 10. С. 1787—1790.
- [8] Брандт Н. Б., Дмитриев В. В., Ладыгин Е. А., Скипетров Е. П. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 3. С. 514—520.
- [9] Брандт Н. Б., Скипетров Е. П., Дмитриев В. В., Кольцов Г. И., Ладыгин Е. А. // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1988. Т. 29. В. 6. С. 95—97.
- [10] Абдувахидов Х. М., Волков А. С., Галаванов В. В. // ФТП. 1970. Т. 4. В. 7. С. 1409—1410.

Московский
государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Получена 5.12.1989
Принята к печати 17.01.1990