

28 см (что в два раза больше величины ζ , просчитанной для постоянной глубины ВКСО $h=30$ м).

Результаты численного эксперимента показаны на рисунке. Здесь для сравнения пунктиром нанесено максимальное превышение уровня поверхности океана при $h=30$ м. Результаты эксперимента, проведенного при максимальном трении на поверхности океана $\tau_m=10$ Па, показали, что форма поверхности океана под ТЦ почти не изменилась по сравнению со случаем $\tau_m=4$ Па, но поверхность океана опускается при этом с большей скоростью. Это говорит о том, что большее трение вызывает более сильные течения, которые разворачиваются силой Кориолиса быстрее. В отличие от экспериментов с $h=\text{const}$ данные эксперименты показали большую чувствительность ζ к изменению P_a . При перепаде давления $\Delta P_a=0$ величина ζ достигает 21 см, что свидетельствует о преобладающем вкладе трения в изменение уровня поверхности океана. Как и в случае постоянной ВКСО, изменение угла втока ветра на периферии ТЦ почти не влияет на превышение уровня поверхности океана.

Авторы благодарны А. А. Соловьеву за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Хаин А. П., Сутырин Г. Г. Тропические циклоны и их взаимодействие с океаном. Л., 1983. [2] Вольцингер Н. Е., Пясковский Р. В. Основные океанологические задачи теории мелкой воды. Л., 1968. [3] Филлипс О. М. // Моделирование и прогноз верхних слоев океана / Под ред. Э. Б. Крауса. Л., 1979. С. 113. [4] Pollard R. T., Rhines P. B., Thomson R. O. R. Y. // Geophys. Fluid Dynamics. 1973. 4, N 4. P. 381.

Поступила в редакцию
19.01.88

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1988. Т. 29, № 6

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 621.315.592

ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В АНТИМОНИДЕ ИНДИЯ, ЛЕГИРОВАННОМ ГЕРМАНИЕМ, ПРИ ГЛУБОКОМ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Н. Б. Брандт, Е. П. Скипетров, В. В. Дмитриев,
Г. И. Кольцов, Е. А. Ладыгин

(кафедра физики низких температур)

Показано, что после p - n -конверсии при электронном облучении образцов p - $\text{InSb}(\text{Ge})$ концентрация электронов проходит через максимум и достигается предельное состояние с проводимостью n -типа. Результаты объясняются в предположении возникновения комплексов первичных дефектов с атомами примеси.

Известно, что высокотемпературное ($T \approx 300$ К) электронное облучение антимоноида индия p -типа приводит к уменьшению концентрации дырок и p - n -конверсии независимо от типа легирующей примеси [1—3]. После p - n -конверсии происходит увеличение концентрации электронов, однако до сих пор остается невыясненным вопрос о предельных значениях электрофизических параметров облученных электронами образцов p - InSb . В настоящей работе исследованы температурные зависимости удельного сопротивления ρ и коэффициента Холла R_x ($4,2 < T < 300$ К, $B < 0,04$ Тл) образцов p - InSb , облученных электронами ($T_{\text{обл}} \approx 300$ К, $E = 4 \div 8$ МэВ, $\Phi < 1,5 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$), с целью изучения поведения электрофизических параметров облученных образцов после p - n -конверсии и определения их предельных значений при глубоком облучении быстрыми электронами.

На рис. 1 приведены температурные зависимости $\rho(T)$ и $R_x(T)$ исследованных образцов при разных потоках облучения. Исходные кристаллы имели p -тип проводимости, и на температурных зависимостях коэффициента Холла наблюдалась характерная инверсия знака R_x при $T \approx 120$ К. При облучении электронами удельное сопротивление и коэффициент Холла в области низких температур увеличиваются, а точка инверсии знака R_x сдвигается в сторону низких температур. При потоке облучения $\Phi = 5 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$ коэффициент Холла изменяет знак и при $\Phi \geq 5 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$ остается отрицательным во всем исследованном интервале температур. Указанные изменения

электрофизических параметров образцов p -InSb(Ge) свидетельствуют об уменьшении концентрации дырок и p - n -конверсии под действием электронного облучения. После p - n -конверсии сначала происходит уменьшение абсолютных величин ρ и R_H , которое можно объяснить увеличением концентрации электронов в облученных образцах (рис. 2). Но затем значения ρ и R_H проходят через минимум ($\Phi \approx 10^{16} \text{ см}^{-2}$), увеличиваются и при $\Phi \geq 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ выходят на насыщение (на рис. 2 приведены максимальные экспериментальные значения коэффициента Холла, наблюдаемые в интервале температур $25 \div 60 \text{ К}$).

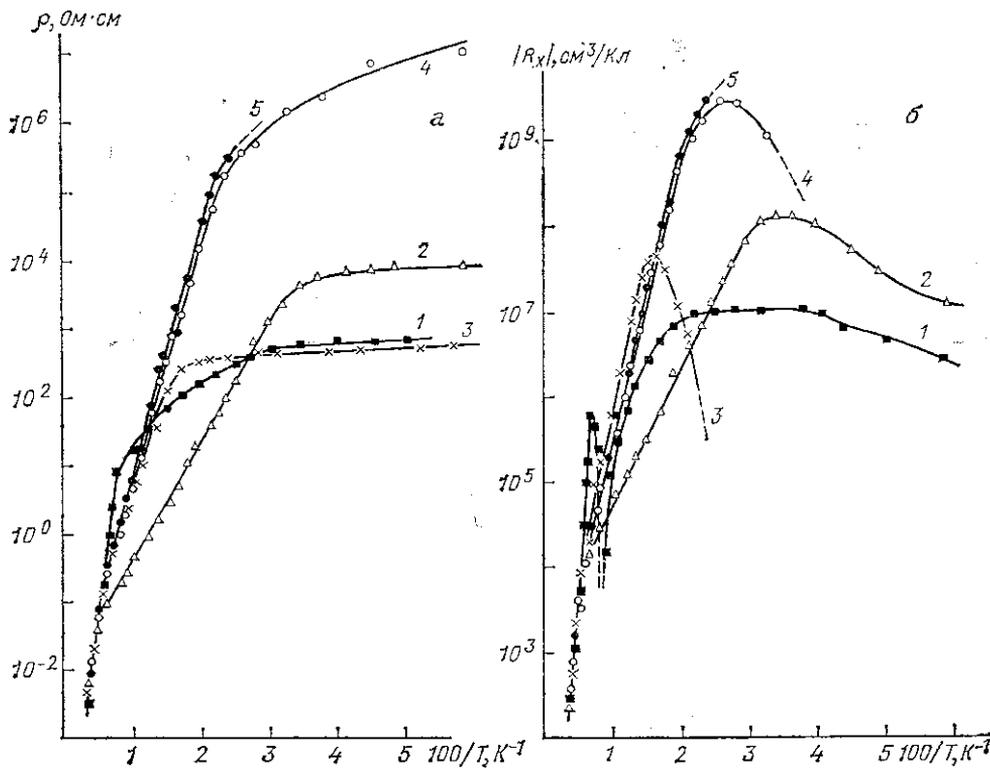


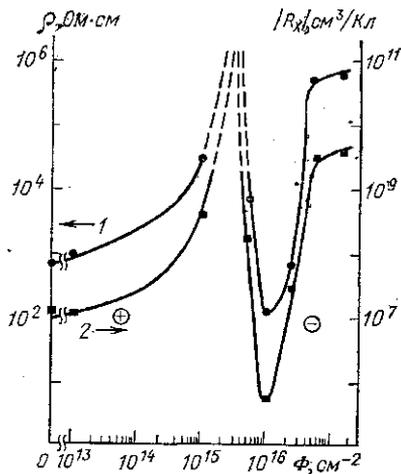
Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления ρ (а) и коэффициента Холла R_H (б) образцов InSb(Ge), облученных быстрыми электронами: $\Phi=0$ (1); $5 \cdot 10^{15}$ (2); $2,3 \cdot 10^{16}$ (3); $5 \cdot 10^{16}$ (4) и $1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (5)

На температурных зависимостях удельного сопротивления и коэффициента Холла облученных образцов после p - n -конверсии появляются активационные участки, которые соответствуют возникновению локальных уровней с энергией ионизации $\Delta E_{11} \approx 0,03 \text{ эВ}$ и $\Delta E_{12} \approx 0,06 \text{ эВ}$ вблизи дна зоны проводимости антимоноида индия. В области больших потоков облучения коэффициент Холла при понижении температуры проходит через максимум, а на зависимостях $\rho(T)$ наблюдаются низкотемпературные активационные участки, что связано, по-видимому, с переходом к проводимости по зоне локальных состояний [4]. Отметим также, что при $\Phi \geq 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ зависимости $\rho(T)$ и $R_H(T)$ практически не изменяются. Совпадение температурных зависимостей удельного сопротивления и коэффициента Холла, а также насыщение зависимостей $\rho(\Phi)$, $R_H(\Phi)$ при $\Phi \geq 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ позволяют говорить о достижении предельного состояния, в котором облученные образцы InSb(Ge) характеризуются проводимостью n -типа и при низких температурах имеют концентрации электронов $n \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Характер зависимостей $\rho(\Phi)$, $R_H(\Phi)$ указывает на существование по крайней мере двух конкурирующих механизмов дефектообразования. Мы предполагаем, что при электронном облучении кристаллов InSb(Ge) возникают как структурные дефекты, характерные для нелегированных кристаллов n -InSb (простейшие дефекты в подрешетках индия и сурьмы и их комплексы с атомами кислорода), имеющие преимущественно

акцепторный характер и вызывающие уменьшение концентрации электронов [5, 6] и n - p -конверсию [7] в кристаллах n -InSb, так и комплексы первичных дефектов с атомами германия, имеющие, видимо, донорный характер. В области потоков облучения $\Phi < 10^{16}$ см $^{-2}$ определяющую роль играют, по-видимому, комплексы первичных дефектов с атомами германия, вызывающие p - n -конверсию в исследованных образцах при облучении. Фактором, ускоряющим p - n -конверсию, может быть изменение соотношения концентраций атомов германия в подрешетках индия и сурьмы при облучении. Дело в том, что германий, являясь амфотерной примесью, располагается как в узлах подрешетки индия, так и в узлах подрешетки сурьмы, играя при этом роль донора и акцептора соответственно [8, 9]. Электронное облучение нарушает равновесное соотношение концентраций вакансий индия и сурьмы, увеличивая долю вакансий индия и стимулируя переходы атомов германия в узлы подрешетки индия [10, 11]. Этим обстоятельством, на наш взгляд, объясняется наибольшая скорость изменения концентрации дырок при электронном облучении антимионида индия легированного германием [2, 3].

Рис. 2. Зависимости удельного сопротивления ρ (1) и коэффициента Холла R_H (2) при $T \approx 30$ К от потока быстрых электронов



Понятно, что процессы дефектообразования, связанные с атомами примеси, имеют естественные границы, определяемые концентрацией атомов германия. Поэтому при достаточно высоких потоках облучения определяющую роль начинают играть структурные дефекты, характерные для нелегированных кристаллов антимионида индия, вызывающие уменьшение концентрации электронов в исследованных образцах при $\Phi > 10^{16}$ см $^{-2}$. Дополнительным доводом в пользу такого предположения можно считать совпадение энергии ионизации локального уровня E_{i2} , обнаруженного в настоящей работе при $\Phi \geq 2.3 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$, с энергиями ионизации «врожденных» структурных дефектов в нелегированных и компенсированных образцах n -InSb [3], а также с энергией ионизации локального уровня, обнаруженного в облученных быстрыми электронами нелегированных кристаллах антимионида индия [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Зайтов Ф. А., Горшкова О. В., Поляков А. Я. и др. // Изв. АН СССР, Неорг. матер. 1982. 18, № 1. С. 8. [2] Зайтов Ф. А., Горшкова О. В., Поляков А. Я. и др. // Там же. 1982. 18, № 11. С. 1777. [3] Зайтов Ф. А., Исачев Ф. К., Поляков А. Я., Кузьмин А. В. Влияние проникающей радиации на свойства антимионида и арсенида индия. Баку, 1984. [4] Брандт Н. Б., Дмитриев В. В., Ладыгин Е. А., Скипетров Е. П. // ФТП. 1987. 21, № 3. С. 514. [5] Витовский Н. А., Машовец Т. В., Оганесян О. В. // ФТП. 1978. 12, № 9. С. 1861. [6] Витовский Н. А., Машовец Т. В., Оганесян О. В. и др. // ФТП. 1978. 12, № 11. С. 2143. [7] Скипетров Е. П., Дмитриев В. В., Зайтов Ф. А. и др. // ФТП. 1986. 20, № 10. С. 1787. [8] Дашевский М. Я., Потапов Ю. В., Неронова Н. Г., Молодцова Е. В. // Твердые растворы элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений. М., 1974. С. 124. [9] Глазов В. М., Смирнова Е. Б. // ФТП. 1983. 17, № 10. С. 1845. [10] Коршунов А. Б., Кузнецов Г. М., Макаров А. Г. и др. // ФТП. 1978. 12, № 5. С. 938. [11] Блаут-Блачев А. Н., Герасименко Н. Н., Лежейко Л. В. и др. // ФТП. 1980. 14, № 2. С. 306.

Поступила в редакцию
09.03.88