

месного излучения в слое GaAs/Ge указывает на достаточное совершенство пленки и незначительную концентрацию остаточных глубоких примесей.

Было проведено также сравнение стабильности электрических свойств исследуемых структур по отношению к воздействию γ -квантов ^{60}Co . Установлено, что в обоих случаях энергетический спектр вводимых облучением электронных ловушек содержит характерные для облученного n -GaAs центры $E2-E5$ [7]. Значения скоростей введения этих ловушек и скорости удаления носителей заряда для структуры GaAs/Ge практически совпадают с соответствующими значениями для GaAs/GaAs.

Представленные экспериментальные данные позволяют заключить, что исследованные эпитаксиальные слои GaAs/Ge по своим электрическим, оптическим свойствам, а также по отношению к воздействию частиц высоких энергий практически не уступают слоям, выращенным традиционным способом на подложках из GaAs, и могут быть использованы для изготовления приборов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Mizuguchi K., Hayafuji N., Ochi S., Mirotoni T., Fujikawa K. // J. Cryst. Growth. 1986. V. 77. N 1-3. P. 509—514.
- [2] Shastry S. K., Zemon S. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 49. N 8. P. 467—469.
- [3] Kobayashi Y., Ikeda K., Shinoda J. // Electron. Lett. 1987. V. 23. N 5. P. 242—244.
- [4] Зорин А. Д., Каратаев Е. Н., Машевский Л. Г., Сивичев М. А., Федорова О. М., Фещенко И. А., Явич Б. С., Яковенко А. А. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 12. С. 2163—2168.
- [5] Берг А., Дин П. Светодиоды. М., 1979. 686 с.
- [6] Roth A. P., Charbonneau S., Goodchild R. G. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 9. P. 5350—5357.
- [7] Ланг Д. // Точечные дефекты в твердых телах. М., 1979. С. 187—220.

Научно-исследовательский институт
прикладных физических проблем
им. А. Н. Савченко БГУ им. В. И. Ленина
Минск

Получено 24.03.1988
Принято к печати 21.07.1988

ФТП, том 23, вып. 1, 1989

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ In И Si НА ЛИНЕЙНОЕ ЭЛЕКТРОПОГЛОЩЕНИЕ В CdTe

Мартынов В. Н., Соловьев А. Н., Шалдин Ю. В., Зерагия Э. М.

В халькогенидах кадмия и цинка примеси взаимодействуют с собственными точечными дефектами решетки с образованием самых разнообразных комплексов, которые могут быть анизотропными, оптически активными центрами [1]. Для их изучения используют различные методы [2]. Нами предложена методика изучения примесно-дефектных комплексов на основе линейного электропоглощения поляризованного и деполаризованного света (ЛЭП), которое зависит от характера симметрии поглощающих центров в кристаллической решетке полупроводника [3].

Исследование выполнено на ориентированных монокристаллических образцах CdTe, не легированных и легированных индием и хлором. Не легированные и легированные хлором образцы имели проводимость p -типа и удельное сопротивление $5 \cdot 10^4$ и $3 \cdot 10^8$ Ом·см соответственно, а легированные индием — проводимость n -типа и $\rho = 2 \cdot 10^7$ Ом·см.

Измерения ЛЭП проводили в спектральном интервале от 1.2 до 1.7 эВ в линейно поляризованном и деполаризованном излучениях на ориентированных образцах размером $6.1 \times 5.2 \times l$, где l — толщина образцов (она варьировалась от 0.07 до 2 мм). Материалом для электродов служила индий-галлиевая паста, наносимая на грани (110). Направление распространения света соответствовало $\langle 110 \rangle$. Детально методика измерений описана в [4].

Известно [5], что в объеме компенсированного пьезополупроводника из-за нестабильности подсистемы свободных носителей относительно внешних воздействий возникают электрические домены. При определенных условиях электрический домен статичен и может занимать практически весь объем исследуемого образца. В результате эффективное значение изменения коэффициента поглощения света α в образцах выбранной ориентации является функцией электрического поля статического домена E_0 и поля внешнего источника $E_1(\omega)$ [6]. В условиях нашего эксперимента, когда изменение поглощения регистрируется на частоте внешнего электрического поля ω , возникновение статического домена должно привести к линейаризации эффекта Франца—Келдыша и тогда суммарное ЛЭП на частоте ω будет равно

$$\alpha^{\Sigma}(\lambda, E_0 E_1) \approx \frac{4\pi}{\lambda} [\delta n_{321}''(\varphi) E_1 + 2\delta n_0''(\omega) E_0 E_1] \approx \frac{4\pi}{\lambda} \delta n_{\Sigma}'' E_1, \quad (1)$$

где $\delta n_{321}'' = \delta n_{321}'' \sin 2\varphi$ — мнимая часть эффективного значения коэффициента тензора 3-го ранга $\delta n_{321}''(\varphi)$, описывающего анизотропию электропоглощения

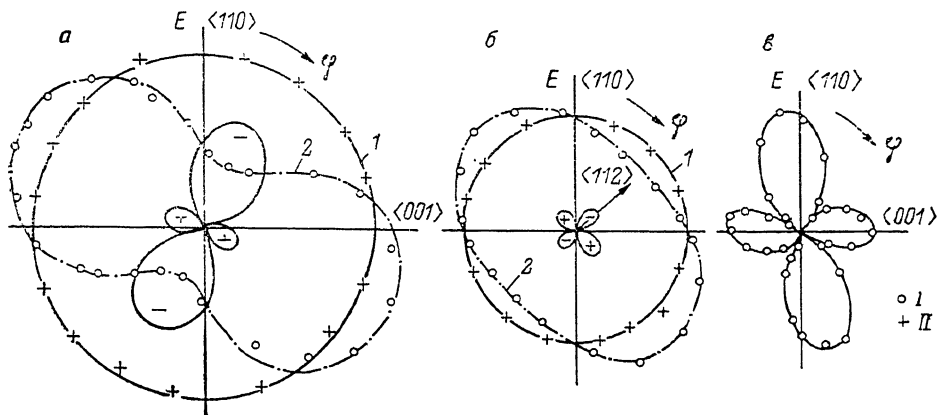


Рис. 1. Ориентационные зависимости коэффициентов электропоглощения в нелегированном (а), легированном In (б) и Cl (в) теллуриде кадмия.

I — ориентационная зависимость коэффициентов: I — $\delta n_{321}''$, II — $\delta n_0''$, сплошная линия — $\delta n_{\Sigma}''$; 1 — в неполяризованном свете, 2 — в поляризованном свете; λ — нм, эВ: а — 1.470, б — 1.448, в — 1.446.

в зависимости от ориентации поляризации волны относительно кристаллографических осей образца, $\delta n_0''$ — коэффициент, определяющий изменение поглощения света за счет эффекта Франца—Келдыша и являющийся скаляром [4]. Ситуация значительно усложняется, если в образцах CdTe имеет место локальная отрицательная дифференциальная проводимость из-за наличия в их объеме ловушек. В этом случае частотная зависимость действительной и мнимой частей полной проводимости полупроводника за счет возникновения волн перезарядки ловушек может носить осциллирующий характер [7]. Поэтому условия эксперимента выбирали так, чтобы полевые зависимости $\alpha^{\Sigma}(E_1)$ были линейной функцией E_1 .

Результаты обработки данных измерений ориентационных зависимостей ЛЭП в нелегированном CdTe приведены на рис. 1, а. По данным измерений ЛЭП в поляризованном и деполаризованном излучениях рассчитана зависимость вклада анизотропного электропоглощения в суммарное значение величины $\delta n_{\Sigma}''$. Из анализа этой зависимости следует, что направления, соответствующие экстремальным значениям $\delta n_{321}''$, не совпадают с кристаллографическими $\langle 112 \rangle$, составляющими в плоскости (110) угол 45° с направлением $\langle 001 \rangle$. Спектральные зависимости рассчитаны для двух взаимно ортогональных направлений ориентации плоскости поляризации света. Полосы ЛЭП носят бесструктурный характер и с понижением температуры сдвигаются в коротковолновую часть спектра (рис. 2, кривые а).

Для образцов CdTe<In> результаты расчетов ориентационных зависимостей показаны на рис. 1, б. Вхождение индия в решетку CdTe приводит к значи-

тельному изменению вида экспериментальных кривых. Из представленных результатов видно, что направления, соответствующие экстремальным значениям величины $\delta n_{321}''$, близки по своему положению к кристаллографическому $\langle 112 \rangle$, но их экстремальные значения различны. Как следует из спектральных зависимостей (рис. 2, кривые б), по мере приближения к полосе поглощения анизотропия ЛЭП существенно возрастает, а на бесструктурном фоне наблюдаются отдельные резонансы. С понижением температуры полосы ЛЭП смещаются в область больших энергий, а их положение по сравнению со спектром ЛЭП для CdTe смещено в область меньших энергий фотонов.

Данные расчетов ориентационных зависимостей ЛЭП в CdTe<Cl> приведены на рис. 1, в. Из анализа ориентационной зависимости следует, что в этих кристаллах ЛЭП носит анизотропный характер. Направления, вдоль которых величины $\delta n_{321}''$ экстремальны, не совпадают с кристаллографическими $\langle 112 \rangle$. Спектральные зависимости величин $\delta n_{321}''$ характеризуются резко выраженной анизотропией (рис. 2, кривые в), а положение их экстремумов сдвинуто в длинноволновую часть спектра по сравнению с данными для CdTe<In>.

Вхождение атомов примесей в решетку CdTe приводит к тому, что ориентационные зависимости величин $\delta n_{321}''$ в CdTe<In> и CdTe<Cl> существенно различны. Если в последнем основной вклад в ЛЭП вносит анизотропная часть электропоглощения, то в образцах CdTe<In> ЛЭП является суммой вкладов изотропного и анизотропного электропоглощения (рис. 1). Обращает на себя внимание тот факт, что в CdTe<Cl> ориентация направлений, соответствующих максимальным значениям величин $\delta n_{321}''$, не совпадает с предсказанной теорией для идеального кристалла. В CdTe<In> ориентация последних близка к теоретической, но сами экстремальные значения различны. По-видимому, при легировании CdTe происходит изменение позиционной симметрии поглощающих центров, в качестве которых могут выступать комплексы СТД—примесь.

Рис. 2. Спектральная зависимость суммарного коэффициента ЛЭП $\delta n_{321}''$ при двух взаимно ортогональных положениях анализатора (I, II), соответствующих экстремальным значениям электропоглощения. Т, К: а — 300, б — 100. 1 — нелегированный CdTe, 2 — CdTe<In>, 3 — CdTe<Cl>.

Другим не менее значительным результатом является экспериментальный факт влияния легирования на спектральные зависимости ЛЭП (рис. 2). Так, в нелегированном CdTe полосы электропоглощения как при 100, так и при 300 К носят бесструктурный характер, с понижением температуры сдвигаются в область больших энергий по закону, аналогичному зависимости $E_g(T)$ [8], и зависят от ориентации плоскости поляризации света относительно кристаллографических направлений. Сравнивая эти данные с результатами измерений спектров ЛЭП в легированных образцах, следует обратить внимание на два обстоятельства: по мере приближения к E_g анизотропия электропоглощения растет, и на фоне достаточно широкой полосы поглощения наблюдается резонансное поглощение. Энергетическое положение полос в CdTe<In> смещено в область меньших значений $\hbar\omega$ по сравнению с данными для CdTe, спектр ЛЭП для CdTe<Cl> смещен еще более в длинноволновую область (рис. 2).

Полуизолирующий CdTe имеет сложный электронный энергетический спектр [9], что затрудняет интерпретацию данных измерений ЛЭП. Анализируя результаты экспериментов, можно отметить, что в легированном CdTe ЛЭП определяется в основном межзонными переходами, однако спектральная ширина полосы и ее затаенное низкоэнергетическое крыло указывают на имеющее место хвосты плотности состояний, связанные с хаотическим распределением заряженных дефектов решетки, с которыми связана анизотропия наблюдаемых полос ЛЭП. Спектры ЛЭП в CdTe<Cl> и CdTe<In> с учетом представленных поляризационных зависимостей свидетельствуют о сложном характере взаимодействия СТД, неконтролируемых примесей и их ассоциатов с легирующими примесями. Характер ориентационных зависимостей наблюдаемых полос ЛЭП относительно ориентации плоскости поляризации падающего света относительно кристаллографических осей образца может объясняться участием в оптических переходах характерных для полуизолирующих образцов CdTe<Cl> и CdTe<In> комплексных центров, симметрия которых отлична от симметрии решетки. В качестве таких центров в CdTe<In> могут выступать комплексы акцепторного типа $[V_{Cd}^{2-}In_{Cd}^{2+}]^{-}$, локальная симметрия которых $3m$ [10], в образцах CdTe<Cl> — $[V_{Cl}^{2-}Cl_{Te}^{2+}]^{-}$, локальная симметрия которых значительно ниже — m [10].

Из сравнения интенсивности полос ЛЭП в легированных образцах следует, что, по-видимому, концентрация комплексов акцепторного типа в образцах CdTe<In> значительно выше. Это находится в соответствии с данными по растворимости хлора и индия в CdTe. В [11] показано, что растворимость хлора в CdTe значительно меньше, чем индия.

Авторы признательны Т. А. Сивоконь за помощь при проведении эксперимента.

Л и т е р а т у р а

- [1] Физика соединений A_2B_6 / Под ред. А. Н. Георгобнани. М., 1986. 319 с.
- [2] Бургуэн Ж., Ланно М. Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты. М., 1985. 304 с.
- [3] Мартынов В. Н., Шалдин Ю. В., Соловьев А. Н., Зерагия Э. М. // Материаловедение халькогенидных и кислородсодержащих полупроводников. Черновцы, 1986. С. 97.
- [4] Шалдин Ю. В., Белогуров Д. А. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 9. С. 1696—1701.
- [5] Бонч-Бруевич В. Л., Звягин И. П., Миронов А. Г. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках. М., 1972. 414 с.
- [6] Уханов Ю. И. Оптические свойства полупроводников. М., 1977. 366 с.
- [7] Каган М. С., Калашников С. Г., Лавдсберг Е. Г., Чернышов И. В. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 8. С. 1379—1382.
- [8] Tsay Y., Mitna S., Veletino J. // J. Phys. Chem. Sol. 1974. V. 34. P. 2167—2173.
- [9] Marfaing Y. // Prog. Cryst. Growth Charact. 1981. V. 4. N 3. P. 317—343.
- [10] Taguchi T., Ray B. // Prog. Cryst. Growth Charact. 1983. V. 6. N 2. P. 103—162.
- [11] Shaw D., Watson E. // J. Phys. (c): Sol. St. Phys. 1984. V. 17. P. 4945—4950.

Московский институт стали и сплавов

Получено 5.04.1988
Принято к печати 21.07.1988

ФТП, том 23, вып. 1, 1989

О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ СКОПЛЕНИЙ МЕЖДОУЗЕЛЬНЫХ АТОМОВ В КРЕМНИИ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Асеев А. Л., Федина Л. И.

Высокая скорость генерации точечных дефектов в процессах ионной имплантации и облучения электронами сопровождается формированием скоплений междоузельных атомов (*i*-скоплений). Так, при облучении кристаллов кремния электронами [1-3] и легкими ионами [4, 5] взаимодействие междоузельных атомов друг с другом и с атомами примесей приводит к образованию главным