

центрации электронов от $\sim 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ картина существенно изменяется, поскольку появляются разрешенные состояния в потенциальных ямах у дна зоны проводимости с эффективной глубиной $\sim (\gamma - E_{\text{min}}^{\Gamma})$. Теперь

$$h\nu_{\text{max}} \sim E_{g^0} - E_{06} - [(\gamma - E_{\text{min}}^{\Delta}) - (\gamma - E_{\text{min}}^{\Gamma})]. \quad (3)$$

При $n \leq 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ выполняются условия $E_{\text{min}}^{\Delta} \ll \gamma$ и $E_{\text{min}}^{\Gamma} \ll \gamma$, так что влиянием энергии основного состояния для электронов и дырок на локальную ширину запрещенной зоны можно пренебречь, и смещение $h\nu_{\text{max}}$ вновь определяется лишь величиной обменной энергии.

Несмотря на то что соотношения (2) и (3) носят оценочный характер, расчет по формуле (3) (кривая 4) находится в удовлетворительном соответствии с экспериментальными данными. Таким образом, зависимость спектрального положения максимума полосы фотолюминесценции от концентрации носителей заряда в широком интервале легирования для твердых растворов $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ переходного диапазона составов определяется главным образом влиянием взаимодействия электронов с разупорядоченно расположенными ионами примеси.

Список литературы

- [1] Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М., 1979. 416 с.
- [2] Крутоголов Ю. К., Довженко С. В., Диордиев С. А., Крутогорова Л. И., Кунакин Ю. И., Рыхжих С. А. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 5. С. 887—890.
- [3] Bugajski M., Lewandowski W. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. N 2. P. 521—530.
- [4] Muller H.-J. // Phys. St. Sol. (b). 1985. V. 132. N 2. P. 607—617.
- [5] Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Гарбузов Д. З., Трукан М. К. // ФТП. 1972. Т. 6. В. 10. С. 2015—2026.
- [6] Рогачев А. А. // ФТТ. 1967. Т. 9. В. 2. С. 369—375.
- [7] Гуляев Ю. В., Плесский В. П. // ЖЭТФ. 1976. Т. 71. В. 4. С. 1475—1480.
- [8] Келдыш Л. В., Прошко Г. П. // ФТТ. 1963. Т. 5. В. 12. С. 3378—3389.

Всесоюзный научно-исследовательский институт
материалов электронной техники
Калуга

Получено 16.04.1990
Принято к печати 27.04.1990

ФТП, том 24, вып. 9, 1990

ПРИМЕСНАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, ЛЕГИРОВАННЫХ ФОСФОРОМ

Васильев В. А., Дышловенко П. Е., Копылов А. А., Лютович К. Л.

Метод фотопроводимости, являющийся одним из наиболее эффективных для исследования примесных состояний в полупроводниках, мало применялся при изучении твердых растворов. Большой практический интерес представляют эпитаксиальные слои твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, где, однако, характер поведения примесей совершенно не исследован.

В настоящей работе впервые исследована примесная фотопроводимость в твердом растворе $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$. Слои n -типа проводимости были получены методом газофазной эпитаксии на подложках p -Si с ориентацией (111). Образцы легировались фосфором в процессе роста. Состав твердого раствора определялся микрорентгеноспектральным анализом и варьировался в пределах $x=0 \div 0.39$. Толщина слоев составляла ~ 5 мкм, удельное сопротивление при комнатной температуре — $5 \div 50 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, концентрация электронов — $5 \cdot 10^{13} \text{—} 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Оптические измерения проводились в диапазоне $50 \div 650 \text{ см}^{-1}$ с использованием длинноволнового фурье-спектрометра ЛФС-1000, снабженного вакуум-

ным гелевым кристаллом Р-118. Исследуемые образцы закреплялись на серебряной фольге, контактирующей непосредственно с медным хладопроводом. Для обеспечения хорошего теплового контакта все соединения фиксировались серебряным контактолом. Излучение концентрировалось на образце с помощью латунного конуса. Омические контакты создавались с использованием лазерной технологии [1], расстояние между контактами ~ 2 мм. В качестве материала навески использовалась сурьма. Присоединение контактных проводников осуществлялось при помощи серебряного контактола. Измерения в основном проводились при температуре ~ 10 К.

При температуре ~ 80 К примесной фотопроводимости не наблюдалось. При $T \approx 10$ К фотоответ устойчиво регистрировался для всех исследованных

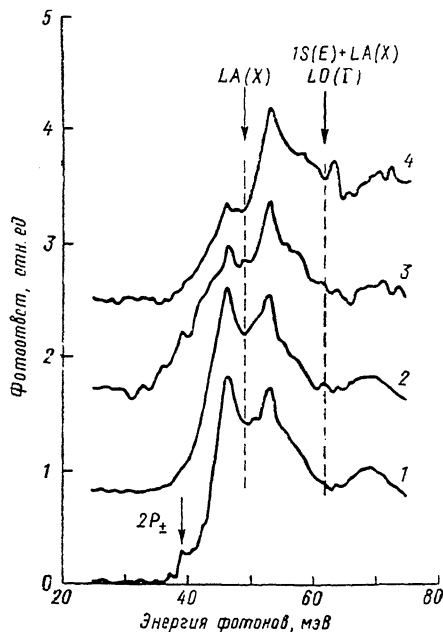


Рис. 1. Спектры фотопроводимости эпитаксиальных слоев $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}:\text{P}$ ($T \approx 10$ К). Остав x : 1 — 0, 2 — 0.024, 3 — 0.15, 4 — 0.39. Напряженность электрического поля ~ 50 В/см. Стрелками показана интерпретация особенностей в спектре. Для удобства кривые смещены по вертикали.

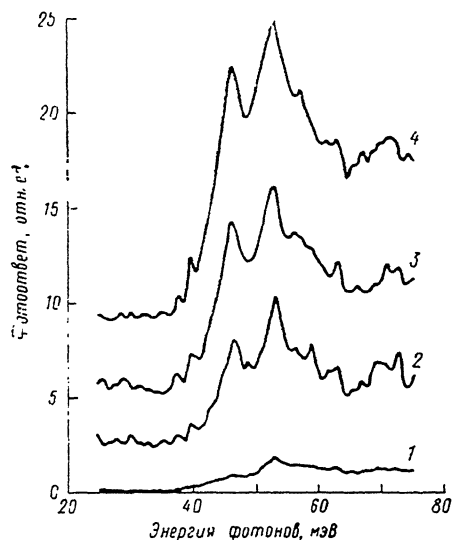


Рис. 2. Спектры фотопроводимости эпитаксиального слоя $\text{Ge}_{0.39}\text{Si}_{0.61}$ ($T \approx 10$ К). Напряженность электрического поля, В/см: 1 — ~ 50 , 2 — ~ 100 , 3 — ~ 130 , 4 — ~ 170 . Для удобства кривые смещены по вертикали.

составов твердого раствора (рис. 1). Видно, что фотопроводимость практически отсутствует при энергиях фотонов ниже 40 мэВ и резко возрастает при больших энергиях, что связано с фотовозбуждением и фотоионизацией донорных центров. Наличие линии 39.2 мэВ вблизи края примесной полосы в слоях, не содержащих Ge, подтверждает присутствие фосфора в исследованных образцах. Данная линия обусловлена фототермической проводимостью с участием перехода $1S(A_1) \rightarrow 2P_{\pm}$ на фосфорном доноре в кремнии [2].

Форма полосы примесной фотопроводимости, как известно, определяется процессами электрон-фононного взаимодействия [3, 4]. Рассеяние носителей заряда в связанные состояния примесного центра за счет уменьшения времени жизни обуславливает появление в спектре характерных минимумов, расположенных при энергиях

$$\hbar\omega = E_j - E_0 + n\hbar\Omega,$$

где E_0 , E_j — энергии основного и возбужденных состояний донорного центра, n и $\hbar\Omega$ — соответственно число и энергия фононов, участвующих в процессе рассеяния. Учитывая двухмодовый характер фононного спектра $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ [5], можно предположить, что для исследованного диапазона составов будут проявляться Si-подобные фононы: $LO(\Gamma)$ вблизи Γ ($\hbar\Omega \approx 64$ мэВ), LO вблизи X

($\hbar\Omega \approx 59$ мэВ) и LA вблизи X ($\hbar\Omega \approx 47$ мэВ). Соответственно минимум вблизи 50 мэВ можно отнести к $LA(X)$ -рассеянию в состоянии $1S(A_1)$, а минимум вблизи 62 мэВ — к $LO(\Gamma)$ -рассеянию в $1S(A_1)$ и $LA(X)$ -рассеянию в $1S(E)$ или $1S(T_2)$.

При небольшой концентрации Ge в твердом растворе порог примесной полосы несколько уширяется по сравнению с собственно кремнием (рис. 1, спектры 1, 2) за счет возникновения неупорядоченности кристаллической решетки. При дальнейшем увеличении концентрации Ge наблюдается относительное снижение фототочности в области 40–50 мэВ вблизи порога, что, по-видимому, отражает уменьшение времени жизни за счет рассеяния, связанного с химической и структурной неупорядоченностью кристалла твердого раствора.

Спектры фотопроводимости исследовались также при различных значениях напряженности электрического поля в образцах (рис. 2). С ростом напряженности электрического поля наблюдаются абсолютный рост сигнала, а также его относительное увеличение в области длинноволнового края примесной полосы, что согласуется с результатами работы [6], где для кремния наблюдалось увеличение вклада более глубоких возбужденных состояний. В нашем случае электрическое поле может оказывать влияние на уровни в области хвоста плотности состояний, индуцированного неупорядоченностью структуры твердого раствора.

В твердом растворе энергия ионизации примесного центра в строгом смысле не определена. В этом случае можно говорить о средней энергии ионизации [7]. Полученные нами данные (рис. 1) указывают на то, что в исследованном диапазоне составов средняя энергия ионизации донора фосфора изменяется незначительно. Сделаем оценку ожидаемого изменения энергии ионизации донора с составом в приближении эффективной массы. Для оценки необходимых параметров будем использовать подход [8]. Экстраполируя, получим для состава $x=0.39$: $X_{1c}-X_{5v}=4.35$ эВ, $a=5.519 \text{ \AA}$, $\epsilon=12.94$, $m_t=0.201m_0$. Приближение эффективной массы [9] дает $E_D(\text{Si})-E_D(\text{Ge}_{0.39}\text{Si}_{0.61}) \approx 5.6$ мэВ.

Список литературы

- [1] Пихтин А. Н., Попов В. А., Яськов Д. А. // ФТП. 1969. Т. 3. В. 11. С. 1646–1648.
- [2] Landolt-Börnstein. Numerical Data and Functional Relationship in Science and Technology. V. 17. Physics of Group IV Elements and III–V Compounds / Ed. by O. Madelung. Berlin—Heidelberg—N. Y., 1982.
- [3] Onton A. // Phys. Rev. Lett. 1969. V. 22. N 7. P. 288–289.
- [4] Scott W. // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. N 1. P. 472–482.
- [5] Barker A. S., Jr., Sievers A. J. // Rev. Mod. Phys. 1975. V. 47 (Suppl.). P. S1–S179.
- [6] Carver G. P., Nicholas R. J., Portal J. C., Stradling R. J. // Sol. St. Commun. 1977. V. 24. N 1. P. 55–60.
- [7] Берндт В., Копылов А. А., Пихтин А. Н. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 11. С. 2206–2209.
- [8] Kopylov A. A. // Sol. St. Commun. 1985. V. 56. N 1. P. 1–6.
- [9] Faulkner R. A. // Phys. Rev. 1969. V. 184. N 3. P. 713–721.

Ленинградский электротехнический институт
им. В. И. Ульянова (Ленина)

Получено 23.04.1990
Принято к печати 27.04.1990

ФТП, том 24, вып. 9, 1990

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ВАРИЗОННЫХ СТРУКТУР $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ В УСЛОВИЯХ МАГНИТОКОНЦЕНТРАЦИОННОГО ЭФФЕКТА

Болгов С. С., Малотенко В. К., Пипа В. И., Савченко А. П.,
Юнович А. Э.

В [1, 2] нами исследовалось рекомбинационное излучение однородных кристаллов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в скрещенных электрическом (E) и магнитном (H) полях. В этих условиях под действием силы Лоренца распределение электронно-ды-