

УДК 535.32

ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ФОСФИДА ИНДИЯ В ОБЛАСТИ СПЕКТРА $\lambda=0.96\div 13$ МКМ

Богданов В. Б., Прокопенко В. Т., Яськов А. Д.

В области спектра $\lambda=0.96\div 13$ мкм при $T=20$ °С методом призмы измерены спектральные зависимости показателя преломления $n(\lambda)$ и его температурного коэффициента $dn(\lambda)/dT$ в фосфиде индия n - и p -типов электропроводности. Определено влияние легирования на дисперсионные зависимости $n(\lambda)$ и dn/dT . Найдена низкочастотная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_0=12.3$.

Опубликованные в последнее время данные по показателю преломления $n(\lambda)$ фосфида индия, а также тройных и четверных твердых растворов с его участием получены в основном методами отражательной рефрактометрии [1-4], не обеспечивающими необходимой точности и достоверности определения $n(\lambda)$. Достаточно отметить, что расхождение данных различных авторов [1-5] составляет до 10%. Проведенные в [1-5] измерения $n(\lambda)$ относятся к ограниченной области спектра вблизи края собственного поглощения (до $\lambda \approx 1.55$ мкм). Вместе с тем InP представляет интерес и как оптический материал для систем среднего ИК диапазона, в связи с чем необходимы измерения его рефрактометрических параметров в более длинноволновой области спектра.

Цель работы состояла в измерении рефрактометрических параметров фосфида индия с точностью, определяемой потребностями оптоэлектронного и оптического приборостроения.

Для измерений $n(\lambda)$ применялись совершенные монокристаллы n - и p -InP с концентрацией свободных носителей заряда в диапазоне $N=1.5\cdot 10^{16}\div 1\cdot 10^{18}$ см⁻³ или $P=5\cdot 10^{17}\div 4\cdot 10^{18}$ см⁻³. Измерения проводились методом наименьшего отклонения на образцах-призмах с размерами преломляющих граней 15×20 мм и углом при вершине $\sim 20^\circ$. Для измерений $n(\lambda)$ применялся зеркальный гониометр-спектрометр, обеспечивавший возможность работы в области спектра до $\lambda=15$ мкм. В процессе измерений образец термостатировался с точностью до ± 0.2 °С. Погрешность измерений показателя преломления была не хуже $\Delta n \leq 0.0002$ для всей указанной области спектра.

Для слабелегированных образцов n -InP, $N=(1.5\div 2.0)\cdot 10^{16}$ см⁻³, измеренные значения показателя преломления приведены в таблице. В области $\lambda \leq 1.2$ мкм эти значения удовлетворительно (с точностью $\Delta n \leq 0.003$) согласуются с данными [3, 5] по дисперсии $n(\lambda)$ и систематически на $\Delta n \approx 0.02$.

Показатель преломления n -InP ($N \leq 2\cdot 10^{16}$ см⁻³) при $T=(20\pm 0.2)$ °С

λ , МКМ	n	λ , МКМ	n	λ , МКМ	n
0.96	3.3699	3.0	3.1049	6.0	3.0783
0.97	3.3572	3.5	3.0986	7.0	3.0707
0.98	3.3461	4.0	3.0986	8.0	3.0623
0.99	3.3361	4.5	3.0894	9.0	3.0532
1.0	3.3271			10.0	3.0464
1.1	3.2658	5.0	3.0857	11.0	3.0302
1.2	3.2293			12.0	3.0153
2.0	3.1326	5.5	3.0819	13.0	3.0006
2.5	3.1151				

превышают результаты измерений этой зависимости [2] из спектров отражения. Спектральная зависимость $n(\lambda)$ (см. таблицу) удовлетворительно описывается осцилляторными приближениями [6] с характерными энергиями $E_g^{\Gamma} = 1.345$, $E_g^{\Lambda} = 2.9$, $E_g^X = 5.0$ эВ и дисперсионными параметрами $\sigma^{\Lambda} = 38.122$ и $G^X = 91.732$ эВ². Среднеквадратичное расхождение расчетных и экспериментальных данных в области $\lambda = 0.96 \div 13$ мкм составило $\sqrt{(\Delta n)^2} \approx 0.005$, что соответствует точности расчетов выражений [6]. Найденное здесь экстраполированное значение низкочастотной диэлектрической проницаемости $\epsilon_0 = 12.3$ для InP ($N = 1.5 \cdot 10^{16}$ см⁻³) находится в хорошем согласии с $\epsilon_0 = 12.55$ [7], полученной для полупроводящего InP прямыми измерениями в области миллиметровых волн. В рассмотренном диапазоне концентраций свободных носителей заряда легирование влияло слабо на показатель преломления InP вблизи края

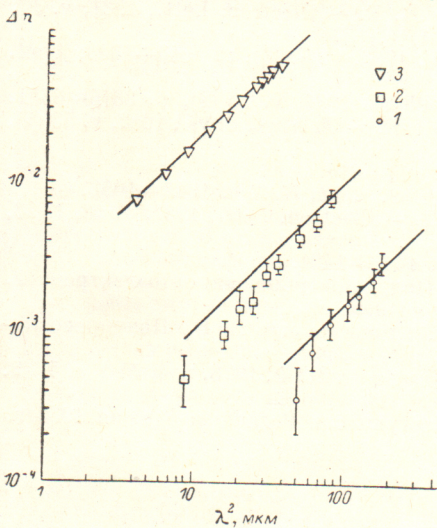


Рис. 1. Вклад свободных носителей заряда в длинноволновую дисперсию показателя преломления n -InP.

Концентрация свободных носителей заряда $N \cdot 10^{18}$, см⁻³: 1 — 0.02, 2 — 0.07, 3 — 0.9. Точки — эксперимент; расчетные зависимости показаны сплошными линиями.

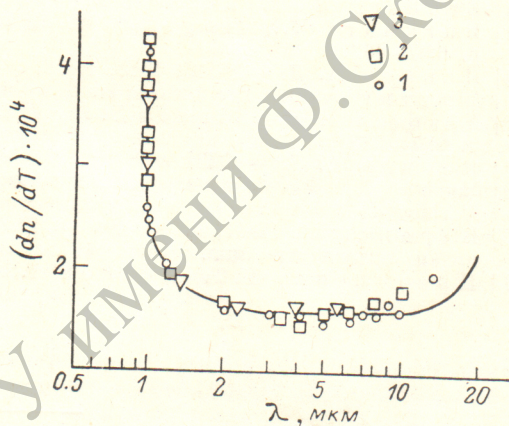


Рис. 2. Температурный коэффициент показателя преломления InP.

Точки — экспериментальные данные для n -InP. Концентрация свободных носителей заряда $N \cdot 10^{18}$, см⁻³: 1 — 0.02; 2 — 0.07; 3 — 0.9. Зависимость, рассчитанная по [6], показана сплошной линией.

собственного поглощения. В сильнолегированных образцах наблюдалось незначительное уменьшение $n(\lambda)$, которое составляло $\Delta n = 0.0095$ в n -InP ($N = 1 \cdot 10^{18}$ см⁻³) и $\Delta n = 0.0005$ в p -InP ($P = 4 \cdot 10^{18}$ см⁻³) при $\lambda = 1$ мкм. Найденное изменение краевой дисперсии $n(\lambda)$ находилось в хорошем качественном соответствии с данными [2, 3] и результатами расчетов по методике [8].

Изменение длинноволновой дисперсии $n(\lambda)$ в легированных образцах InP определялось концентрацией свободных носителей заряда. Для трех образцов n -InP вклад свободных носителей заряда в показатель преломления, определяемый в области спектра $(\omega\tau)^2 \gg 1$ как $\Delta n = (e^2 N / 8\pi^2 c^2 m^* n) \lambda^2$ [9], сопоставлен с экспериментальными данными на рис. 1, где видно удовлетворительное (близкое к погрешности измерений) совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей $\Delta n = f(\lambda)$.

Измеренный температурный коэффициент показателя преломления InP dn/dT в зависимости от длины волны излучения показан точками на рис. 2. Сплошной линией на рис. 2 изображена зависимость dn/dT , рассчитанная на основании дисперсионных соотношений [6] при условии $G^{\Lambda, X} = \text{const}(T)$, а также $dE_g^{\Lambda, X}/dT \approx 0.3 \cdot 10^{-3}$ эВ/К [10]. Для исследованных образцов температурный коэффициент dn/dT имел близкие значения и слабо зависел от легирования материала.

Одновременно с измерением показателя преломления производилась оценка оптической неоднородности материала по методике, аналогичной [11]. Оцененная вариация показателя преломления по объему кристалла находилась на уровне чувствительности установки и не превышала $\delta_n \leq 0.0005$.

Приведенные данные позволяют заключить, что фосфид индия имеет благоприятное сочетание рефрактометрических параметров и может быть использован также в ИК оптических системах различного назначения, в частности для создания элементов градиентной оптики на кристаллах со специальным профилем легирования.

Авторы благодарны А. Я. Нашельскому за предоставленные кристаллы фосфида индия.

Литература

- [1] Chandra P., Coldren L. A., Strege K. E. — Electron. Lett., 1981, v. 17, N 1, p. 6—7.
- [2] Whalen M. S., Stone J. — J. Appl. Phys., 1982, v. 53 (6), p. 4340—4343; Appl. Phys. Lett., 1982, v. 41 (12), p. 1140—1142.
- [3] Broberg B., Lindgren S. — J. Appl. Phys., 1984, v. 55 (9), p. 3376—3381.
- [4] Burkhard H., Dinges H. W., Kuphal E. — J. Appl. Phys., 1982, v. 53 (1), p. 655—662.
- [5] Яськов А. Д. — ЖПС, 1983, т. 38, № 5, с. 811—814.
- [6] Пухтин А. Н., Яськов А. Д. — ФТП, 1978, т. 12, № 6, с. 1047—1053.
- [7] Neidert R. E., Binary S. C., Weng T. — Electron. Lett., 1982, v. 18, N 23, p. 987—988.
- [8] Яськов А. Д. — ФТП, 1983, т. 17, № 8, с. 1478—1481.
- [9] Мосс Т., Баррелл Г., Эллис Б. Полупроводниковая оптоэлектроника. М., 1976.
- [10] Баранский П. И., Клочков В. П., Потыкевич И. В. Полупроводниковая оптоэлектроника. Киев, 1975. 704 с.
- [11] Прокопенко В. Т., Яськов А. Д. — Письма в ЖТФ, 1978, т. 4, № 1, с. 7—9.

Поступило в Редакцию 5 июня 1985 г.