

К. ф.-м. н. А. С. ГАРКАВЕНКО, д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ

Украина, г. Львов, Центр физ.-мат. исследований "Кварк";
Одесский гос. политехнический университет
E-mail: vadim@vag.intes.odessa.ua

Дата поступления в редакцию
06. 11 2000 г.
Оппонент к. т. н. С. Н. ДРАНЧУК

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ФОСФИД ГАЛЛИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРОВ И МОЩНЫХ СВЕТОДИОДОВ

Облучение нелегированных монокристаллов GaP быстрыми нейтронами позволяет получить слои соединения ZnP, сильно легированные кремнием и галлием.

Фосфид галлия относится к алмазоподобным полупроводникам типа A_3B_5 со структурой цинковой обманки (сфалерит), которая может рассматриваться как комбинация двух вставленных одна в другую кубических гранецентрированных решеток, смещенных относительно друг друга на четверть диагонали куба и состоящих из одного сорта атомов каждая. Элементарной ячейкой является ячейка гранецентрированной решетки, содержащая два разных атома — галлия (Ga) и фосфора (P), соответственно. Некоторые характерные параметры этого материала приведены в **таблице** [1, 2].

Фосфид галлия используется для изготовления полупроводниковых светодиодов красного и зеленого цвета свечения [3]. Однако он не является прямозонным материалом и поэтому не пригоден для изготовления полупроводниковых лазеров, характерной особенностью которых является большой квантовый выход излучения вследствие наличия прямых зон. Однако если бы каким-либо образом можно было модифицировать свойства этого полупроводника и превратить его из непрямозонного материала в прямозонный, то он получил бы еще более широкое применение в лазерной и полупроводниковой технике.

Анализ литературных данных [1, 2] показал, что результатом потенциальной модификации GaP может быть гипотетическое (не полученное до сих пор) соединение ZnP. Можно сделать некоторые

предположения о его зонной структуре: валентная зона аналогична по своей структуре соединению A_3B_5 ; зона проводимости аналогична ZnS. Поэтому по аналогии с ZnS можно предположить, что ZnP — прямозонный материал. Для расчета зонной структуры полупроводниковых соединений типа A_3B_5 , A_2B_6 , A_1B_7 и т. д. часто использовался метод возмущения кристаллического потенциала [4], из которого следует, что ширину запрещенной зоны ZnP можно представить как

$$E_g(\text{ZnP}) = E_g(\text{GaP}) + b\lambda^2,$$

где $E_g(\text{GaP})$ — ширина запрещенной зоны GaP;
 b — некоторая постоянная добавка к энергии;
 λ — параметр, характеризующий степень возмущения и для соединений A_3B_5 принимаемый равным 1.

Известно также, что нарастание ионного типа связи и уменьшение среднего атомного номера элементов, составляющих соединение, ведет к увеличению ширины запрещенной зоны E_g (см. таблицу). Из вышесказанного можно заключить, что

$$E_g(\text{GaP}) < E_g(\text{ZnP}) \leq E_g(\text{ZnS}).$$

Рассмотренный выше качественный анализ послужил предпосылкой для проведения экспериментов по созданию этого гипотетического вещества.

С помощью радиационной технологии соединение GaP было модифицировано в новое полупроводниковое соединение ZnP, которое, вследствие сложности его диаграммы состояния [5], практически невозможно получить традиционными методами выращивания кристаллов. Нелегированные образцы GaP в виде монокристаллических пластин толщиной 340 мкм облучались пучком быстрых нейтронов с энергиями

Средний атомный номер элементов $Z_1+Z_2/2$	Полупроводниковое соединение	Структура	E_g , эВ, при $T=300$ К	Постоянная решетки, Å	Плотность, г/см ³	Показатель преломления
32	GaAs	Сфалерит	1,45	5,6534±0,0001	5,4	3,3
23	GaP	То же	2,25	5,447±0,006	4,10	3,2
23	ZnS	“	3,54	5,4145±0,00009	4,087	2,3
22,5	ZnP	“	3,50	5,4048±0,0005	4,02	2,2

5–1 МэВ и дозой $3,6 \cdot 10^{20}$ нейтрон/см² (использовался импульсный периодический ядерный реактор типа ИБР-30 с плотностью потока нейтронов $\sim 10^{16}$ см⁻²с⁻¹). В результате ядерных реакций, происходящих при таком облучении, стабильные изотопы галлия $^{69}_{31}\text{Ga}$ и $^{71}_{31}\text{Ga}$ превратились в стабильные изотопы цинка $^{66}_{30}\text{Zn}$ и $^{68}_{30}\text{Zn}$ с концентрацией $1,6 \cdot 10^{19}$ см⁻³ и $1 \cdot 10^{19}$ см⁻³, соответственно, а стабильный изотоп фосфора $^{31}_{15}\text{P}$ превратился в стабильный изотоп кремния $^{28}_{14}\text{Si}$ с концентрацией $2,4 \cdot 10^{19}$ см⁻³.

Затем проводилось несколько циклов имплантации ионов Zn^+ с энергией 100 кэВ, дозой $1,2 \cdot 10^{16}$ ион/см² и отжига образцов при температуре 500°C в атмосфере паров цинка.

Из принципов изоморфизма (взаимозаменяемости атомов в кристаллах) следует, что цинк Zn, имеющих атомный радиус 1,34 Å, хорошо замещает Ga с атомным радиусом 1,32 Å [6]. Это подтвердили проведенные опыты, в результате которых из полупроводниковых кристаллов GaP были получены полупроводниковые монокристаллические слои ZnP, сильно легированные кремнием и галлием. Определение их химического состава производилось методом рентгеноспектрального анализа, а кристаллическая структура и постоянная решетки — методом рентгеноструктурного анализа [7]. Показатель преломления определялся спектрофотометрическим методом [3] и методом призмы [8], а ширина запрещенной зоны — по зависимости коэффициента поглощения от энергии фотона (спектры пропускания измерялись на установке КСВУ-23М). Данные этих измерений представлены в таблице.

Оказалось, что полупроводниковое соединение ZnP обладает структурой тетраэдрического типа и является (как и предполагалось) прямозонным полупроводником с разрешенными прямыми оптическими переходами и пригоден для изготовления на

его основе полупроводниковых лазеров и мощных светодиодов в видимой области спектра от синего-голубой до красной. Полученные результаты позволяют рекомендовать облучение быстрыми нейтронами для управления свойствами монокристаллов фосфида галлия вплоть до изменения его химического состава.

В заключение следует отметить, что проблема создания инжекционных полупроводников лазеров в синего-голубой области спектра является пока нерешенной, а светодиоды из монокристаллов SiC имеют очень низкий внешний квантовый выход излучения, составляющий для наиболее ярких образцов $\sim 4 \cdot 10^{-3}\%$ [3]. Таким образом, создание нового материала ZnP открывает дорогу для решения этой проблемы.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Горюнова Н. А. Сложные алмазоподобные полупроводники. — М.: Сов. радио, 1968.
2. Маделунг О. Физика полупроводниковых соединений элементов 3 и 5 групп. — М.: Мир, 1967.
3. Гаркавенко А. С., Кондрат Ю. М., Меньшикова Т. П., Писак Ю. В. Современное состояние и перспективы развития светодиодов и светодиодных индикаторных устройств отображения визуальной информации. — К.: 1992. — 72 с. (Препринт ИПМ НАНУ.)
4. Цидильковский И. М. Зонная структура полупроводников. — М.: Наука, 1978.
5. Кауфман Л., Бернштейн Х. Расчет диаграмм состояния с помощью ЭВМ. — М.: Мир, 1972.
6. Макаров Е. С. Изоморфизм атомов в кристаллах. — М.: Атомиздат, 1972.
7. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электроннооптический анализ. — М.: Металлургия, 1970.
8. Лебедев М. В., Страшникова М. И., Тимофеев В. Т. и др. // Письма в ЖЭТФ. — 1984. — Т. 39. — С. 366–370.



ВЫ ЕЩЕ МОЖЕТЕ

оформить подписку на журнал «ТКЭА» (выходит 6 раз в год, индекс 71141) в любом отделении связи.

Непосредственно через редакцию можно подписаться начиная с первого номера.

Для этого

- переведите в адрес редакции по почте (Украина, 65028, Одесса, ул. Б. Хмельницкого, 59) или на указанный расчетный счет соответствующую сумму (цена одного номера — 15 грн.);
- не забудьте прислать в редакцию письмо-заявку с адресом, по которому нужно высылать журнал, и копию документа, подтверждающего оплату.

Реквизиты для перечисления на счет

✓ в гривнах:

Получатель ДП «Нептун-Технология», ОКПО 24543343.

Банк получателя: Отд. № 6 "Ильичевское" ЦО ПИБ в г. Одессе, МФО 328135, р/с 26002301535969.

Назначение платежа: за подписку на журнал "ТКЭА".

✓ в российских рублях:

Корсчет Проминвестбанка Украины № 3011181000000000284 в Сбербанке России, БИК 044525225, ИНН 7707083893, корсчет № 30101810400000000225 в ОПЕРУ Московского ГТУ Банка России. Назначение платежа: для ДП «Нептун-Технология», ОКПО 24543343, р/с 6002301535969, код 810 в отд. № 6 "Ильичевское" ЦО ПИБ в г. Одессе, МФО 328135, за подписку на журнал "ТКЭА".