

Приведенные на рис. 1 результаты получены на кристаллах, легированных во время их роста. Однако представляет интерес исследование кристаллов кремния, легированных ионной имплантацией или диффузией соответствующей легирующей примеси. Была исследована дефокусировка лазерного луча в кремнии марки КЭФ-1, вырезанном в направлении [111] и имплантированном бором при $E=80$ кэВ (отожженном), т. е. когда в исходный материал n -типа вводится акцепторная (компенсирующая) примесь. Результаты исследования степени дефокусировки приведены на рис. 2 (на вставке показан профиль распределения примеси по толщине кристалла). Как видно, увеличение дозы имплантации приводит уже к уменьшению степени дефокусировки. Такой же результат получен и для кремния марки КДБ-10, легированного путем термодиффузии примесью As (донор, глубина около 7 мкм) (треугольники на рис. 2).

Таким образом, получена зависимость между степенью легирования и светонаведенным изменением показателя преломления, который обуславливает степень дефокусировки лазерного луча. Этот результат показывает, что нелинейная рефракция в возбужденных кристаллах связана не только с ННЗ, вносящими отрицательный вклад в показатель преломления, но и с перезарядкой мелких примесных состояний [2]. Это открывает перспективы целенаправленного изменения нелинейных свойств кристаллов Si путем их легирования разными примесями, обладающими небольшой глубиной залегания. Следует заметить, что мелкие примесные состояния способствуют нелинейной рефракции не только в Si, но и в полупроводниках групп $A^{III}B^V$, $A^{IV}B^VI$ [3-5]. Полученные результаты также указывают на возможность неразрушающего контроля технологического процесса изготовления приборов микроэлектроники на основе кремния, арсенида галлия и других полупроводников.

Л и т е р а т у р а

- [1] Балтрамеюнас Р., Велецкас Д., Каптураускас И. Дефокусировка лазерного излучения и механизм светонаведенного изменения показателя преломления в кремнии. — ФТТ, 1985, т. 27, в. 10, с. 2931—2935.
- [2] Castner T. G., Lee N. K., Cieloszyk G. S., Salinger G. L. — Phys. Rev. Lett., 1975, v. 34, N 26, p. 1627—1630.
- [3] Балтрамеюнас Р., Велецкас Д., Каптураускас И. Самовоздействие световых пучков в монокристаллах CdSe. — Письма ЖТФ, 1984, т. 10, в. 9, с. 522—526.
- [4] Балтрамеюнас Р., Велецкас Д., Дебейкис К., Каптураускас И. Самодефокусировка лазерных пучков в монокристаллах Si и GaAs. — В кн.: Тез. докл. XII Всес. конф. по когерентной и нелинейной оптике. М., 1985, ч. II, с. 180—181.
- [5] Балтрамеюнас Р., Велецкас Д., Каптураускас И., Кажукаускас В., Стораста Ю. Нелинейная рефракция и изменение холловской подвижности в сильно возбужденных кристаллах CdSe. — ФТП, 1986, т. 20, в. 7, с. 1243—1247.

Вильнюсский
государственный университет
им. В. Капсукаса

Получено 10.12.1986
Принято к печати 30.04.1987

ФТП, том 22, вып. 1, 1988

СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Воронина Т. И., Лагунова Т. С., Саморуков Б. Е., Стругов Н. А.

Слои арсенида галлия, выращиваемые методом жидкофазной эпитаксии, содержат значительную концентрацию фоновых примесей Si, O, S, C и др. Для снижения содержания остаточных примесей используются различные способы: длительный отжиг (24—65 ч) раствора-расплава в потоке водорода, вакуумный высокотемпературный отжиг галлия и графитовых кассет, добавление паров воды в водород и др. [1-3]. Обнадеживающие результаты получены по очистке слоев InP и InGaAs с помощью редкоземельных элементов (РЗЭ) [4, 5]. Целью

Параметры ЭС GaAs, легированных РЗЭ

№ образца	РЗЭ, мас%	300 К		77 К	
		$n, \text{см}^{-3}$	$\mu, \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$n, \text{см}^{-3}$	$\mu, \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
A3	0	$2 \cdot 10^{17}$	3350	$1.8 \cdot 10^{17}$	4100
A7	Sc 0.01	$1.5 \cdot 10^{17}$	4660	$1.2 \cdot 10^{17}$	5800
A8	Sc 0.02	$7 \cdot 10^{16}$	5600	$6.3 \cdot 10^{16}$	7800
A11	Sc 0.03	$2 \cdot 10^{16}$	6070	$1.3 \cdot 10^{16}$	15 200
A14	Sc 0.04	$8 \cdot 10^{14}$	6700	$7.2 \cdot 10^{14}$	13 300
A16	Sc 0.05	$p=1.5 \cdot 10^{16}$	200	—	—
A18	Yb 0.01	$6 \cdot 10^{16}$	3750	$5 \cdot 10^{16}$	6100
A20	Yb 0.02	$3 \cdot 10^{16}$	6300	$2.3 \cdot 10^{16}$	12 000
A21	Yb 0.05	$p=3 \cdot 10^{15}$	260	—	—
B2	0	$3 \cdot 10^{16}$	4200	$2.2 \cdot 10^{16}$	9500
B4	Yb 0.005	$2.1 \cdot 10^{16}$	4700	$1.5 \cdot 10^{16}$	11 000
B5	Yb 0.01	$1.5 \cdot 10^{16}$	5900	$8.7 \cdot 10^{15}$	21 300
B12	Yb 0.025	$7 \cdot 10^{15}$	5700	$6.8 \cdot 10^{15}$	24 700
B17	Yb 0.03	$4.5 \cdot 10^{15}$	8000	$4 \cdot 10^{15}$	52 000
B19	Sc 0.03	$6 \cdot 10^{14}$	6000	$5 \cdot 10^{14}$	35 000

настоящей работы явилось исследование эпитаксиальных слоев (ЭС) арсенида галлия, легированных РЗЭ. В качестве последних использовались скандий и иттербий — полярные элементы в ряду РЗЭ.

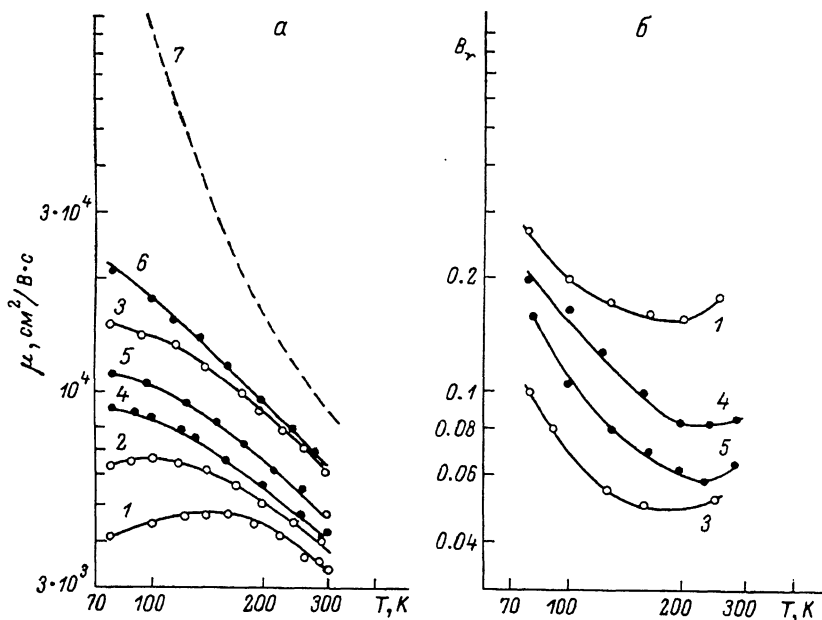


Рис. 1. Температурная зависимость подвижности электронов μ (а) и коэффициента магнетосопротивления B_H (б) в зависимости от температуры в образцах серий А и В.

Номера образцов: 1 — А3, 2 — А18, 3 — А11, 4 — В2, 5 — В4, 6 — В5; 7 — теоретическая решеточная подвижность.

ЭС арсенида галлия толщиной 20—60 мкм выращивались по стандартной технологии в графитовых кассетах панельного типа. В качестве подложки использовались полуизолирующие кристаллы арсенида галлия с ориентацией (100).

Результаты измерений эффекта Холла на некоторых образцах приведены в таблице, из которой видно, что при введении в расплав Sc и Yb получают слои n -типа проводимости, причем с ростом концентрации РЗЭ падает концентрация электронов в ЭС на 2 порядка и более, при содержании РЗЭ ≥ 0.05 мас% вырастают слои p -типа проводимости.

Подвижность электронов в легированных образцах выше, чем в нелегированных, причем она значительно больше в образцах серии В, где исследованы образцы, выращенные из более чистых исходных материалов (см. таблицу и рис. 1, а). Это указывает на то, что уменьшение концентрации носителей заряда $n=N_D - N_A$ (N_D — концентрация доноров, N_A — концентрация акцепторов) происходит не за счет роста компенсирующих примесей N_I , а за счет уменьшения общей концентрации ионов примесей $N_I = N_D + N_A$.

Раздельно определенные концентрации примесей N_D и N_A из подвижности и концентрации носителей в зависимости от содержания иттербия показаны на рис. 2. Видно, что при содержании Yb ≤ 0.01 мас % наблюдается уменьшение концентрации как доноров, так и акцепторов по сравнению с исходным материалом, при этом степень компенсации $k = N_A/N_D$ практически не меняется. Дальнейшее увеличение содержания Yb приводит к более резкому уменьшению концентрации доноров по сравнению с акцепторами. Степень компенсации при этом увеличивается. Введение примеси скандия приводит к аналогичным результатам, однако рост компенсации начинается при содержании Sc ≥ 0.03 мас %.

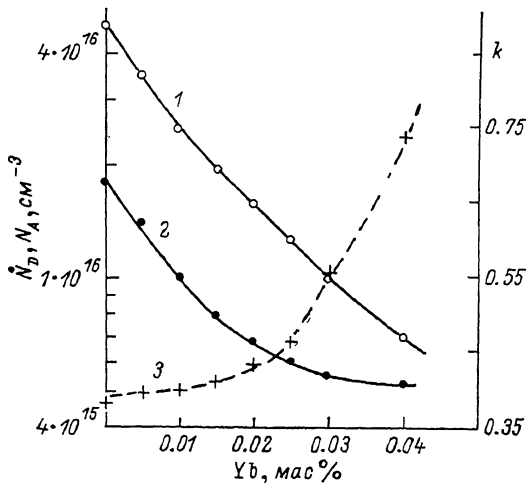


Рис. 2. Зависимость концентрации доноров (1), акцепторов (2) и степени компенсации (3) в эпитаксиальных слоях арсенида галлия от содержания иттербия в жидкой фазе.

Исследования поперечного магнитосопротивления $\Delta\rho/\rho$ в зависимости от температуры, напряженности магнитного поля H и концентрации РЗЭ показали, что при малом содержании РЗЭ (≤ 0.03 мас %) $\Delta\rho/\rho$ изменяется пропорционально H^2 , а коэффициент $B_r = \Delta\rho/\rho/\mu^2 H^2$ уменьшается при введении РЗЭ и его температурная зависимость определяется полностью изменением механизма рассеяния (рис. 1, б). Эти данные, а также отсутствие в образцах продольного магнитосопротивления свидетельствуют об однородности материала и об отсутствии в образцах кластеров, порождающих области пространственного заряда.

При введении РЗЭ > 0.03 мас % значения подвижности ЭС становятся существенно меньше как по сравнению с теоретическими значениями подвижности (при $n = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $\mu \approx 250\,000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T = 77 \text{ К}$), так и с подвижностью в ЭС, очищенных длительным отжигом. В последних образцах значения подвижности достигали величины $170\,000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [6]. Такая ситуация обусловлена, вероятно, тем, что в легированных РЗЭ образцах не только увеличивается степень компенсации примесей, но и образуются микровключения РЗЭ с примесями неметаллов. В пользу последнего предположения свидетельствуют данные по температурной зависимости статической магнитной восприимчивости легированных образцов [7]. Аналогичные микровключения РЗЭ с кислородом, азотом и др. наблюдались в образцах фосфида галлия [8].

Л и т е р а т у р а

- [1] Green P. D. — J. Appl. Phys., 1973, v. 44, N 4, p. 1550—1554.
- [2] Alferov Zh. I., Andreev V. M., Konnikov S. G. — Krist. a. Techn., 1975, v. 10, p. 103—110.
- [3] Kanfman L. M., Heime K. — J. Cryst. Growth, 1976, v. 34, N 2, p. 287—297.
- [4] Гацов К. А., Гореленок А. Т., Карпенко С. Л. и др. Эффекты легирования редкоземельными элементами в низкотемпературной люминесценции InP. — ФТП, 1983, т. 17, в. 12, с. 2148—2151.

- [5] Баграев Н. Т., Власенко Л. С., Гапоев К. А. и др. Влияние редкоземельных элементов на подвижность носителей в эпитаксиальных слоях InP и InGaAs. — ФТП, 1984, т. 18, в. 1, с. 83—85.
- [6] Yshii M., Kan H., Sasaki W. — Appl. Phys. Lett., 1976, v. 29, N 1, p. 375.
- [7] Романов В. В., Саморуков Б. Е. Магнитная восприимчивость кристаллов GaP⟨Dy⟩. — Изв. вузов СССР, Физика, 1980, № 9, с. 103—104.
- [8] Касаткин В. А., Кесаманлы Ф. П., Мастеров В. Ф. и др. Влияние примесей лантаноидов на свойства GaP. — Изв. АН СССР, Неорг. матер., 1980, т. 16, в. 11, с. 1901—1905.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получено 18.03.1987
Принято к печати 18.05.1987

ФТП, том 22, вып. 1, 1988

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ДЛИННЫХ ДИОДНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ВАРИЗОННЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Al_xGa_{1-x}As$

Пека Г. П., Пулеметов Д. А., Радзивилук В. А.,
Смоляр А. Н., Шимулите Е. А.

В длинных инжекционных фотодиодах (ИФД) с варизонной базой теоретически была показана зависимость области спектральной чувствительности (переход от широкополосного спектра к селективному) от уровня инжекции, интенсивности освещения Φ_0 и градиента ширины запрещенной зоны E_g при направлении освещения, параллельном ∇E_g [1].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование эффекта управления спектрами фоточувствительности варизонных ИФД, предсказанного в [1], на примере плавных гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As$. В связи с особенностями технологии изготовления структур $p^+(GaAs)-p(Al_xGa_{1-x}As)-n(Al_xGa_{1-x}As)-n^+(GaAs)$ (рис. 1, а), выращенных методом жидкофазной эпитаксии, фотовозбуждение удобнее проводить в направлении, перпендикулярном ∇E_g , поэтому в работе выполнен также расчетный анализ спектров фоточувствительности при таком способе освещения.

Расчет фотопроводимости варизонной n -базы, освещаемой монохроматическим собственным светом низкой интенсивности перпендикулярно ∇E_g (рис. 1, а), показал, что размеры области модуляции проводимости базы в направлении ∇E_g (по оси z)

$$\Delta z_1 = \frac{\epsilon}{|\nabla E_g|} \left(1 + \ln \frac{a}{L_p} \right) + L_p^+ + L_p^-, \quad (1)$$

где ϵ — характеристическая энергия в законе Урбаха для коэффициента поглощения [2], a — размер базы по оси y , L_p — диффузионная, а L_p^\pm — диффузионно-дрейфовые длины дырок в ускоряющем и тормозящем встроенных полях. Условием наблюдения эффектов изменения области спектральной чувствительности должна быть локальность модуляции проводимости базы вдоль оси z , т. е. $\Delta z_1 < d$. Кроме того, при рассматриваемом способе освещения условие локальности накладывает дополнительное ограничение на скорость рекомбинации на освещаемой поверхности s , которое, как показывает расчет, имеет вид

$$\frac{s}{D_p} L_p + 1 \geq \frac{d}{\Delta z_1} - 1, \quad (2)$$

где D_p — коэффициент диффузии дырок.

Экспериментально исследовались структуры двух типов (1 и 2) со следующими значениями параметров при 77 К, определенными по методике [3]: $L_p = 1.3 \div 1.5$ мкм, значение E_g в области $p-n$ -перехода $E_g^{\max} = 1.83 \div 1.84$ эВ, в области n^+-n -перехода $E_g^{\min} = 1.51$ эВ, $d_2 = 21.4 \div 21.6$ мкм, $d_3 = 1.8 \div 3$ мкм —