

ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ СОБСТВЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ GaAs

Тигиняну И. М., Пышная Н. Б., Спицын А. В., Ураски В. В.

Показано, что имплантация ионов галлия и мышьяка в нелегированные полуизолирующие кристаллы арсенида галлия приводит к уменьшению абсолютного значения слоевого коэффициента Холла R_{HS} , а постимплантационный отжиг под пленкой двуокиси алюминия в интервале температур $400 \div 650$ °С — к его частичному или полному восстановлению. Установлено образование слоев p -типа с концентрацией дырок до $4 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$ в кристаллах, имплантированных ионами галлия и отожженных при температурах $T_{отж} > 740$ °С. Исходя из величины энергии активации проводимости в слоях, равной 0.22 ± 0.01 эВ, сделано предположение о том, что дырочная проводимость обусловлена формированием в материале в условиях избытка галлия акцепторных центров Ga $_{As}$.

Одна из возможностей управления электрическими параметрами соединений A III B V состоит в создании отклонений состава образцов от стехиометрии в пределах области гомогенности. В случае кристаллов GaAs установлено, однако, что концентрация свободных носителей в них не превышает величину $\sim 10^{16}$ см $^{-3}$ при изменении содержания мышьяка в расплаве от 44 до 53 ат% [1, 2]. Это обусловлено, по всей вероятности, частичной самокомпенсацией дефектов в материале. Представляет интерес использовать для обогащения соединений A III B V компонентами неравновесный метод ионного внедрения.

Данная работа посвящена исследованию электрических характеристик слоев GaAs, полученных имплантацией ионов мышьяка и галлия в специально не легированные полуизолирующие пластины арсенида галлия с ориентацией (100). Пластины толщиной 0.5 мм были изготовлены путем нарезки в последующей механической и химической полировки шайб из монокристаллических слитков GaAs с удельным темновым сопротивлением $\sim 8 \cdot 10^7$ Ом·см при 300 К, выращенных методом Чохральского, с жидкостной герметизацией расплава. Имплантация ионов галлия с энергией 300 кэВ проводилась на ускорителе фирмы High Voltage Engineering Europa, а ионы мышьяка с энергией 40 кэВ — на установке «Везувий-3». После имплантации на поверхность пластин наносилась защитная пленка Al $_2$ O $_3$ толщиной 0.2 мкм, полученная электронно-лучевым распылением сапфировой подложки в вакууме. Постимплантационный отжиг под пленкой проводился в атмосфере азота в течение 15 мин при постоянной температуре в интервале $400 \div 800$ °С. После отжига защитная пленка удалялась погружением образцов на 2 с в буферный травитель (HF : H $_2$ O = 1 : 50). Электрические параметры определялись из измерений эффекта Холла на автоматизированной установке У-749 методом Ван-дер-Пау.

Перейдем к изложению экспериментальных результатов.

На рис. 1 приведена зависимость слоевого коэффициента Холла R_{HS} , измененного при комнатной температуре, для имплантированных кристаллов GaAs от температуры отжига $T_{отж}$. Внедрение ионов компонентов приводит, как видно из рисунка, к существенному уменьшению $|R_{HS}|$. При этом и слоевое сопротивление кристаллов уменьшается от $1.6 \cdot 10^9$ до $10^4 \div 10^5$ Ом/□. Аналогич-

ный результат образования низкоэнергетических слоев при внедрении в полупроводниковый арсенид галлия различных тяжелых и легких ионов (He^+ , Ar^+ , N^+ , S^+ , Zn^+ и др.) был получен авторами [3]. Малые значения подвижности носителей в имплантированных слоях до отжига (менее $1 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) свидетельствуют о сильном разрушении кристаллов. В результате постимплантационного отжига в интервале температур $400 \div 650 \text{ }^\circ\text{C}$ увеличивается значение $|R_{HS}|$ кристаллов, измеренное при комнатной температуре, причем отжиг при $550 \leq T_{\text{отж}} \leq 650 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к возрастанию $|R_{HS}|$ до значений, характерных для исходного кристалла. Дальнейшее увеличение температуры отжига образцов, облученных ионами галлия, вызывает рост R_{HS} вплоть до изменения его знака с «-» на «+», т. е. инверсию типа проводимости слоев (рис. 1, кривые 2 и 3). В то же время постимплантационный отжиг слоев арсенида галлия, облученных ионами мышьяка, не приводит к инверсии типа проводимости.

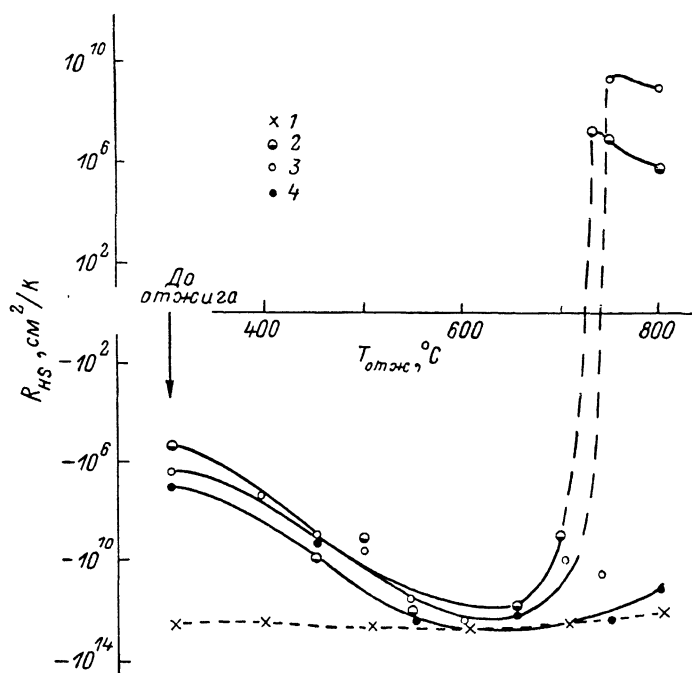


Рис. 1. Слоевой коэффициент Холла при 300 К в исходном (1) и облученном ионами галлия (2, 3) и мышьяка (4) арсениде галлия в зависимости от температуры отжига кристаллов.

Доза имплантации, см^{-2} : 2 — $3 \cdot 10^{13}$, 3 — $3 \cdot 10^{15}$, 4 — $7 \cdot 10^{15}$.

Для определения энергии активации проводимости в слоях GaAs, обогащенных собственными компонентами, была измерена температурная зависимость слоевого сопротивления образцов ρ_s в интервале $100 \div 400 \text{ К}$. На рис. 2 приведены экспериментальные данные для кристаллов GaAs в координатах $\rho_s = f(10^3/T)$. Для исходных образцов характерен резкий спад ρ_s с температурой (на рис. 2 им соответствуют штриховые линии). Энергия активации проводимости, оцененная по наклону графика $\rho_s = f(10^3/T)$, составляет $E_1 = 0.80 \pm 0.01 \text{ эВ}$, что совпадает с глубиной залегания основной электронной ловушки EL2 [4, 5] и близко по значению к энергии активации собственной проводимости материала. Ионная имплантация с последующим отжигом при температурах не выше $550 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к появлению прямолинейного участка на графике температурной зависимости ρ_s с наклоном, равным $0.10 \pm 0.01 \text{ эВ}$.

Полученный вид зависимости $\rho_s = f(10^3/T)$ для имплантированных кристаллов (рис. 2) можно объяснить, если учесть, что вклад в измеряемую величину слоевого сопротивления структуры вносят параллельно соединенные сопротивления подложки и имплантированного слоя:

$$\rho_s^{-1} = \rho_{s1}^{-1} \exp(-E_1/kT) + \rho_{s2}^{-1} \exp(-E_2/kT), \quad (1)$$

где первый член в правой части определяется сопротивлением подложки, а второй — сопротивлением имплантированного слоя. Естественно предположить при этом, что значения подвижности электронов в подложке и в разрушенном имплантацией слое заметно различаются, а именно $\mu_{s1} \gg \mu_{s2}$. В таком случае для трактовки экспериментальных результатов, представленных на рис. 2, можно использовать модель независимого участия в проводимости носителей с сильно различающимися значениями подвижности [6]. В рамках этой модели

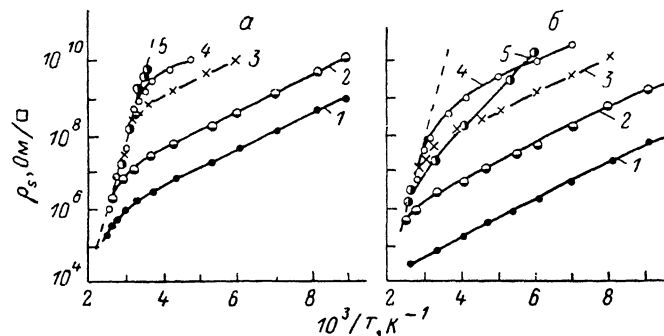


Рис. 2. Температурная зависимость поверхностного сопротивления кристаллов GaAs, облученных ионами мышьяка (а) и галлия (б) до (1) и после отжига при 450 (2), 500 (3), 550 (4) и 800 °С (5).

Доза имплантации, см⁻²: а — $7 \cdot 10^{16}$, б — $3 \cdot 10^{18}$.

(если $E_1 > E_2$ и $\rho_{s1}^{-1} > \rho_{s2}^{-1}$, что выполняется в нашем случае) существует температура T_0 , соответствующая равенству слагаемых в (1), которая характеризуется изломом на кривых $\rho_s = f(10^3/T)$ и локальным максимумом на кривых $|R_{HS}| = f(10^3/T)$. При $T > T_0$ значение ρ_s образца определяется сопротивлением подложки, а при $T < T_0$ — сопротивлением имплантированного слоя. Если в результате отжига ρ_{s1}^{-1} остается неизменным, а ρ_{s2}^{-1} уменьшается, то T_0 должно сдвигаться в сторону низких температур. Эта закономерность хорошо прослеживается на экспериментальных кривых (рис. 2, 3).

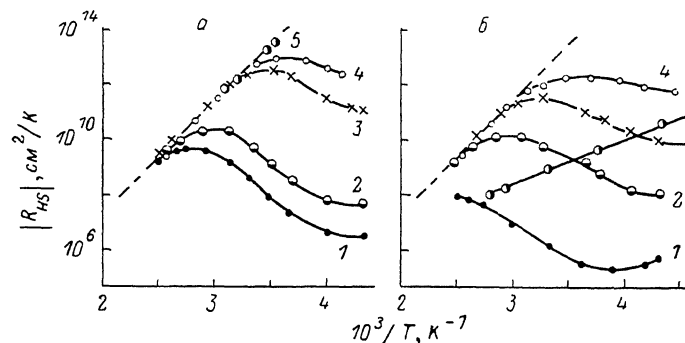


Рис. 3. Температурная зависимость слоевого коэффициента Холла кристаллов арсенида галлия, облученных ионами мышьяка (а) и галлия (б) до (1) и после отжига при 450 (2), 500 (3), 550 (4) и 800 °С (5).

Доза имплантации, см⁻²: а — $7 \cdot 10^{16}$, б — $3 \cdot 10^{18}$.

Как отмечалось выше, отжиг кристаллов арсенида галлия, имплантированных ионами галлия, при $T_{отж} > 740$ °С приводит к инверсии типа проводимости (рис. 1). Возникновение дырочной проводимости в слоях, обогащенных галлием, обусловлено, по-видимому, непосредственно атомами внедренного галлия, а именно антиструктурными дефектами Ga_{As} с акцепторными свойствами [7]. Известно, что центр Ga_{As} имеет два энергетических уровня с глубиной 77 ÷ 78 эВ и 200 ÷ 230 мэВ [7]. Энергию активации проводимости E_3 в слоях p-типа мы оценили, исходя из анализа температурных зависимостей электрических параметров слоев (рис. 2, б, 3, б, кривые 5). Полученное значение $E_3 \approx 0.22$ эВ

хорошо коррелирует с величиной второй энергии ионизации (0.20 ± 0.23 эВ) акцепторного центра Ga_{As} .

Распределение дырок по глубине было найдено при помощи послойного травливания пластин в 0.2 %-м растворе брома в метаноле (рис. 4). Максимальная концентрация дырок в p -слоях достигает $4 \cdot 10^{17}$ $см^{-3}$, что более чем на порядок превосходит максимальное значение p , которое можно достичь путем отклонения от стехиометрии при росте [1, 2]. Более полные сведения об электрических параметрах слоев арсенида галлия p -типа, полученных путем

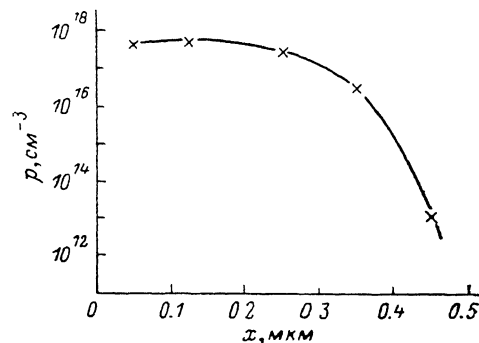


Рис. 4. Профиль распределения дырок в кристалле арсенида галлия, облученном ионами галлия при дозе $3 \cdot 10^{15}$ $см^{-2}$ и отожженном при температуре $800^\circ C$ в течение 15 мин.

имплантации ионов галлия, суммированы в таблице (при расчете параметров толщина слоев была принята равной 0.25 мкм).

Таким образом, имплантация ионов собственных компонентов в монокристаллы полупроводящего арсенида галлия приводит к образованию сравнительно низкоомных слоев, поверхность которых растет с увеличением $T_{отж}$ в интервале $400 \div 700^\circ C$. Характер воздействия на кристаллы постимплантационного отжига при $T_{отж} > 740^\circ C$ существенно зависит от вида внедренных ионов. В слоях, обогащенных ионами галлия и отожженных при $740 \div 800^\circ C$, происходит инверсия типа проводимости от электронного к дырочному, что не наблюдается в случае имплантации ионов мышьяка. Сделано

предположение, что проводимость p -типа обусловлена образованием антиструктурных дефектов Ga_{As} , обладающих акцепторными свойствами.

В заключение авторы выражают благодарность С. И. Радауцану и А. Н. Георгобиани за внимание к работе и полезные дискуссии.

Л и т е р а т у р а

- [1] Holmes D. E., Chen R. T., Elliott K. R., Kirkpatrick C. G. — Appl. Phys. Lett., 1982, v. 40, N 1, p. 46—48.
- [2] Figielski T. — Appl. Phys. A, 1984, v. 35, N 4, p. 255—261.
- [3] Kato Y., Shimada T., Shiraki Y., Komatsubara K. F. — J. Appl. Phys., 1974, v. 45, N 3, p. 1044—1049.
- [4] Болтакс Б. И., Колотов М. Н., Скорятина Е. А. — Изв. вузов СССР, Физика, 1983, № 10, с. 56—66.
- [5] Мильвидский М. Г., Освенский В. Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. М., 1984. 256 с.
- [6] Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М., 1979. 416 с.
- [7] Георгобиани А. Н., Тигиняну И. М. — ФТП, 1988, т. 22, в. 1, с. 3—15.

Институт прикладной физики
АН МССР
Кишинев

Получена 18.03.1988
Принята к печати 6.05.1988