

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА ОПТИЧЕСКИЕ
И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ $AlGaAs : Si$ А.М. Васильев, П.С. Копьев,
В.С. Лысенко, А.Н. Назаров,
Г.А. Наумовец, В.Б. Попов,
А.С. Ткаченко, В.М. Устинов

Известна способность атомарного водорода нейтрализовывать электрически активные дефекты в полупроводниках. В последнее время интенсивно исследуется влияние водорода на свойства эпитаксиальных слоев $GaAs$ и $AlGaAs$ [1-8]. Для $AlGaAs$ наблюдались пассивация мелких донорных примесей и DX -центров [1, 2, 8], а также центров безызлучательной рекомбинации [6, 7], приводящие к падению концентрации носителей заряда и росту интенсивности собственной фотолюминесценции.

В настоящей работе исследуется влияние гидрогенизации и последующего отжига на примесную фотолюминесценцию (ФЛ) и транспортные свойства эпитаксиальных слоев $AlGaAs$, легированных кремнием.

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии на полуизолирующих $GaAs$ подложках были выражены структуры, позволявшие исследовать ФЛ от $AlGaAs : Si$ и нелегированного $GaAs$, а также электрофизические свойства $AlGaAs : Si$. Они включали следующие слои (в порядке роста): (1) буферный $GaAs$; (2) $AlGaAs$; (3) $GaAs$; (4) $AlGaAs$ (все эти слои не легированы) и (5) верхний слой $AlGaAs$ (молярная доля Al $x=0.3$), легированного кремнием до уровня $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Температура подложки при росте составляла от 610 до 630 °С. Для трех образцов, обозначенных условно А, Б и В, толщины слоев (3)-(5) составляли соответственно: 0,5, 0,15 и 1,05 мкм (А), 0,4, 0,23 и 1,05 мкм (Б) и 0,2, 0,6 и 1,5 мкм (В). Структуры гидрогенизировались в плазме ВЧ-разряда (13,6 МГц) в течение 30 мин при давлении

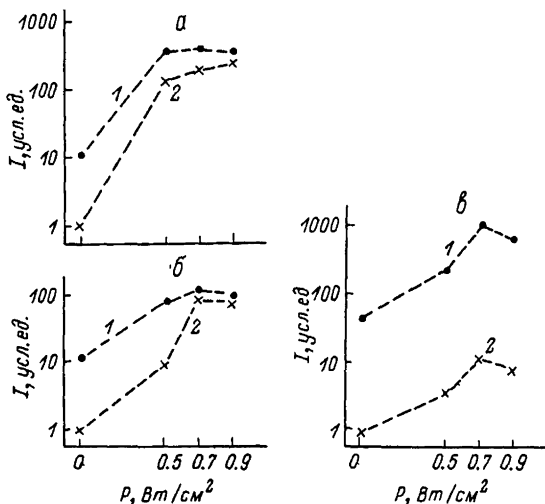


Рис. 1. Влияние гидрогенизирующей обработки при различных мощностях разряда P на интегральную интенсивность I полос ФЛ $AlGaAs$ (1) и $GaAs$ (2) при $T=77$ К для структур А (а), Б (б) и В (в). (Пунктирные линии условны).

водорода 5 мТор, мощности разряда от 0.5 до 0.9 Вт/см² и температуре подложки 200 °С. На образцах проводились измерения спектров ФЛ при температурах 5 К и 77 К и возбуждении He-лазером ($\lambda=632.8$ нм) с мощностью от 0.05 до 0.5 Вт/см². Для холловских измерений по методу ван дер Пау вжигались индиевые контакты.

В спектрах ФЛ всех образцов наблюдались две основных полосы излучения, соответствующие (1) рекомбинации носителей на примесных центрах в верхнем слое $AlGaAs$ ($h\nu=1.7-1.8$ эВ) и (2) межзонной рекомбинации в $GaAs$ (слой 3). После гидрогенизации полоса (1) усиливается, сужается и на 25–50 мэВ сдвигается в коротковолновую сторону. Полоса же (2) становится более интенсивной и несколько уширяется (см. рис. 1). Аналогичное поведение этих полос наблюдалось и при увеличении мощности возбуждения. Таким образом, гидрогенизация влияет на спектры ФЛ подобно эффективному увеличению мощности возбуждения. Отметим также, что в работе [5] гидрогенизация приводила к росту энергии активации мелких доноров, что связывалось с сужением донорного уровня при понижении уровня легирования. Этот эффект также должен приводить к коротковолновому сдвигу полосы примесной ФЛ.

На рис. 1 показаны интегральные интенсивности двух полос ФЛ для образцов, гидрогенизированных при различной мощности разряда. В структуре В, где слой $GaAs$ расположен на глубине 2.1 мкм от поверхности образца, интенсивность $GaAs$ полосы растет слабее, чем $AlGaAs$. В структурах же А и Б, где слой $GaAs$ расположен ближе к поверхности (соответственно 1.2 и 1.3 мкм), гидрогенизация приводит к более сильному росту полосы $GaAs$. В то же время концентрация фоновых примесей (в том числе служащих центрами безызлучательной рекомбинации) в эпитаксиальных слоях $GaAs$ обычно меньше, чем в слоях $AlGaAs$. Поэтому наблюдаемый эффект обусловлен главным образом подавлением процессов безызлучательной рекомбинации в $AlGaAs$, в результате чего увеличивается доля фотовозбужденных носителей, переходящих в слой $GaAs$ и рекомбинирующих там [6]. В структурах Б и В увеличение мощности ВЧ-разряда до 0.9 Вт/см^2 приводит к некоторому падению интенсивности обеих полос ФЛ. Видимо, это связано с усилением процесса генерации дефектов в приповерхностном слое обрабатываемых структур.

Пассивация электрически активных центров может приводить к изменению транспортных свойств слоя $AlGaAs$. Холловские измерения дали исходные значения концентрации электронов $1.0 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и подвижности $420 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при температуре 300 К и $320 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при 77 К. Гидрогенизация (0.7 Вт/см^2) понижает концентрацию носителей до $3.8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Подвижность также несколько падает – до 375 и $240 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ соответственно при 300 и 77 К. Следует отметить, что эффект гидрогенизации уже несколько ослаблен в результате вжигания омических контактов (2 мин при 300 °С), поскольку такой прогрев частично восстанавливает активность нейтрализованных водородом мелких центров [1, 2]. Интенсивность обеих полос ФЛ после вжигания контактов при 300 °С также несколько падает.

Таким образом, гидрогенизация слоев $AlGaAs$ ($x=0.3$), вызывающая рост интенсивности ФЛ, в то же время не приводит к улучшению подвижности электронов в $AlGaAs$ (как и по данным [5]). Это означает, что центры безызлучательной рекомбинации, лимитирующие интенсивность ФЛ, не оказывают определяющего влияния на подвижность, т.е. подвижность и интенсивность ФЛ в слоях $AlGaAs$ определяются различными механизмами. Отметим также, что пассивация мелких доноров (центров излучательной рекомбинации) сама по себе должна вызывать ослабление примесной люминесценции $AlGaAs : Si$. Однако одновременная пассивация и центров безызлучательной рекомбинации при гидрогенизации сильнее влияет на интенсивность примесной ФЛ, что в итоге и приводит к ее росту.

Исследовалась также реактивация центров безызлучательной рекомбинации при прогреве обработанных образцов. На рис. 2 приведены зависимости интегральной интенсивности и полуширины полос ФЛ $AlGaAs : Si$ и $GaAs$ от температуры прогрева (на примере структуры Б). При каждой температуре образец прогревался в течение 5 мин в атмосфере аргона. Прогрев до 200 °С не влияет на

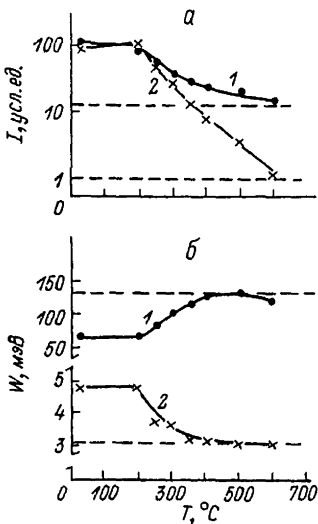


Рис. 2. Влияние прогресса на интегральную интенсивность 1 (а) и полуширину W (б) полос ФЛ AlGaAs (1) и GaAs (2). Пунктирные прямые показывают соответствующие значения для контрольных образцов.

интенсивность ФЛ, а при 600 $^{\circ}\text{C}$ исходные интенсивность и форма спектра восстанавливаются практически полностью. По сравнению с мелкими донорами и DX -центрами [1, 2] активность центров безызлучательной рекомбинации восстанавливается в более широком диапазоне температур. Пятиминутный отжиг при 500 $^{\circ}\text{C}$ реактивирует мелкие доноры практически полностью [1, 2], тогда как интенсивность ФЛ остается все еще заметно более высокой, чем в исходном образце. Возможно, водород пассивирует несколько различных типов центров безызлучательной рекомбинации, которые реактивируются

при различных температурах (или эти центры обладают существенным разбросом параметров).

Таким образом, водород пассивирует в эпитаксиальных слоях $\text{AlGaAs} : \text{Si}$ центры как излучательной (мелкие доноры), так и безызлучательной рекомбинации. Влияние второго эффекта на интенсивность примесной ФЛ оказывается более сильным, в результате чего она растет. Центры безызлучательной рекомбинации реактивируются при несколько более высоких температурах, чем мелкие легирующие примеси.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Pearson S.J., Dautremont-Smith W.C., Chevallier J., Tu C.W., Cummings K.D. // J. Appl. Phys. 1986. V. 59. No. 8. P. 2821-2827.
- [2] Nability J.C., Stalova M., Lopata J., Dautremont-Smith W.C., Tu C.W., Pearson S.J. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 50. No. 14. P. 921-923.
- [3] Pan N., Bose S.S., Kim M.H., Stillman G.E., Chambers F., Devane G., Ito C.R., Feng M. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. No. 8. P. 596-598.

- [4] Jackson G.S., Pan N., Feng M.S., Stillman G.E., Holonyak N.Jr., Burnham R.D. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. No. 20. P. 1629-1631.
- [5] Mostefaoui R., Chevallier J., Jalil A., Pesant J.C., Tu C.W., Kopf R.F. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. No. 1. P. 207-210.
- [6] Pavesi L., Martelli F., Martin D., Reinhart F.K. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. No 16. P. 1522-1524.
- [7] Pavesi L., Martin D., Reinhart F.K. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 55. P. 475-477.
- [8] McCluskey F.P., Pfeiffer L., West K.W., Lopata J., Schnoes M.L., remont-Smith W.C. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. No. 18. P. 1769-1771.

Поступило в Редакцию
1 июля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 20

26 октября 1990 г.

07

© 1990

ПРОСВЕТЛЕНИЕ ДИССИПИРУЮЩЕЙ СРЕДЫ
ПРИ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ВСТРЕЧНЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

В.В. Сидоренков, В.В. Толмачев

Как известно, интерференционный поток энергии двух встречных плоских электромагнитных волн, распространяющихся в идеальной диэлектрической среде, отсутствует при любых значениях их амплитуд и начальных фаз. Действительно, в плотности интерференционного потока суммарного поля указанных волн $\vec{P}_{\text{ИНТ}} = [\vec{E}_1 \vec{H}_2] + [\vec{E}_2 \vec{H}_1]$ (в силу условия $E \sqrt{\epsilon \epsilon_0} = H \sqrt{\mu \mu_0}$) слагаемые компенсируют друг друга: $[\vec{E}_1 \vec{H}_2] = -[\vec{E}_2 \vec{H}_1]$. В настоящей работе показано, что когда среда поглощающая (и даже сильно поглощающая), интерференционный