

ПАССИВАЦИЯ АКЦЕПТОРНЫХ ЦЕНТРОВ В ФОСФИДЕ ИНДИЯ АТОМАРНЫМ ВОДОРОДОМ

Омельяновский Э. М., Пахомов А. В., Поляков А. Я., Шепекина Г. В.

Исследовано влияние обработки атомарным водородом на электрические и люминесцентные характеристики эпитаксиальных пленок $p\text{-InP(Mn)}$. Показано, что такая обработка приводит к пассивации марганцевых акцепторов, а также центров безызлучательной рекомбинации в $p\text{-InP(Mn)}$. Оценена термическая стабильность комплексов водорода с акцепторами. Высказываются соображения в пользу того, что в InP водород является глубоким донором.

Взаимодействие атомарного водорода с примесями и дефектами в полупроводниках вызывает в последнее время большой интерес у исследователей. Этот интерес связан с установленной возможностью пассивировать с помощью атомарного водорода целый ряд мелких и глубоких центров в кремнии, германии, арсениде галлия и некоторых других материалах (обзор можно найти в [1]). Представляется важным выяснить, насколько универсально это явление и каковы его особенности в важнейших полупроводниках. Мы уже сообщали ранее [2] об успешной попытке пассивации мелких доноров в фосфиде индия. В настоящей работе эффективность этого процесса сравнивается с эффективностью пассивации в фосфиде индия акцепторов — марганца.

Эксперименты проводились на эпитаксиальных пленках InP(Mn) , полученных методом жидкофазной эпитаксии на полуизолирующих подложках InP(Fe) . Концентрация марганца в пленках, вычисленная из коэффициента распределения, установленного с помощью масс-спектральных измерений, составляла около $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Пленки имели толщины от 1.5 до ~ 20 мкм. До и после обработки в атомарном водороде на пленках проводились измерения электрофизических характеристик в диапазоне 77—300 К, а также снимались спектры фотолюминесценции в диапазоне 0.6—1.5 эВ. Измерения проводились обычным методом Ван-дер-Пау. Спектры фотолюминесценции снимались при температуре 77 К, для возбуждения использовался He—Ne-лазер с длиной волны 0.63 мкм и мощностью ~ 10 мВт.

Гидрогенизация проводилась при помощи источника, описанного в [3] и модифицированного так, чтобы исключить ионную бомбардировку и травление [2]. Температура водородной области 400 °С, время обработки 30 мин.

Электрические характеристики наших образцов уже исследовались детально и описаны нами в более ранней работе [4]. Марганец создает в этих образцах сравнительно глубокие акцепторные уровни с энергией $E_a + 0.25$ эВ. При низких температурах происходит переход к прыжковой проводимости по уровням марганца с характерными участками ε_7 проводимости [4] (рис. 1, 1). В спектрах фотолюминесценции (ФЛ) наблюдается одна широкая полоса с пиком при 1.14 эВ, связанная с переходами на уровень марганца [5] (рис. 2, кривая 1).

После гидрогенизации в образце с толщиной эпитаксиального слоя 1.8 мкм концентрация дырок упала от $7.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ до $< 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Уровень Ферми больше не закреплен на уровне марганца, а «съезжает» на уровень $E_a + 0.35$ эВ (эта ловушка присутствует в материале в исходном состоянии [6] (рис. 1, 2)). В спектрах фотолюминесценции интенсивность полосы 1.14 эВ после гидро-

генизации даже возросла (рис. 2, кривая 2). Учитывая то, что концентрация электрически активных акцепторов, связанных с марганцем, очень сильно уменьшилась, можно, по-видимому, говорить о гидрогенизации и концентрации глубоких центров, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации.

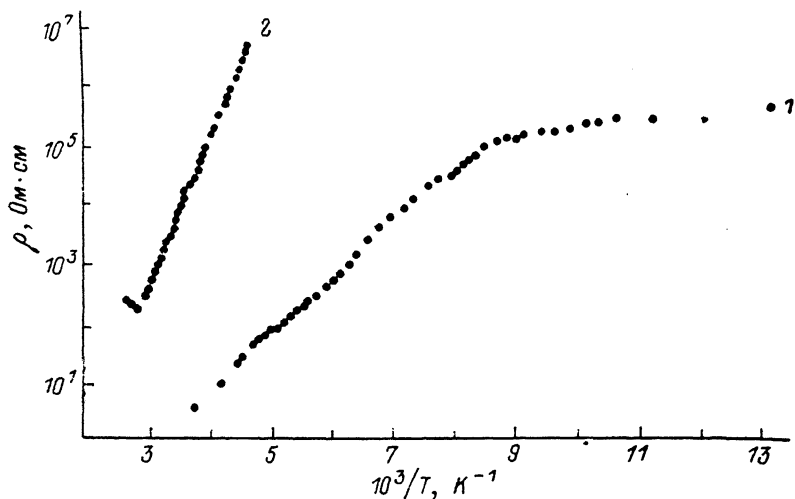


Рис. 1. Температурная зависимость удельного сопротивления для тонкой ($d=1.8$ мкм) пленки InP(Mn) до (1) и после (2) гидрогенизации.

В толстой (13.4 мкм) эпитаксиальной пленке измеренная концентрация дырок при 300 °С уменьшилась от $4.3 \cdot 10^{16}$ до $2.7 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Очевидно, это связано с неполной пассивацией по глубине.

Следует отметить, что эффективность пассивации марганцевых акцепторов в InP значительно выше, чем эффективность пассивации мелких доноров, описанная нами в [2]. Это положение сильно напоминает кремний, для которого Пантелидесу удалось непротиворечиво объяснить результаты экспериментов по водородной пассивации, предположив, что водород — глубокий донор [7]. Можно думать, что таково же положение и в фосфиде индия. Разумеется, разница в эффективности пассивации в InP могла бы быть связана и с различием в конкретном «устройстве» соответствующих комплексов. Однако, по данным ИК спектроскопии [8, 9], микроструктура комплексов Mn—H в InP должна быть похожа

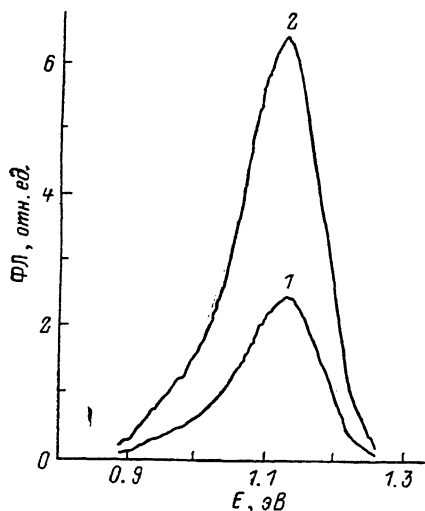


Рис. 2. Спектры фотолуминесценции для того же образца (см. рис. 1) до (1) и после (2) гидрогенизации.

на микроструктуру комплексов В—Н в Si. К тому же в [10] сообщается о пассивации водородом в InP акцепторов, связанных с цинком. Эффективность процесса очень близка к той, которую мы наблюдали для марганца, хотя структура соответствующих акцепторов совершенно различна.

Термическая стабильность комплексов водорода с марганцем изучалась нами с помощью изохронных отжига в токе молекулярного водорода, развал комплексов с водородом начинается при 350 °С и имеет энергию активации 1.6 эВ. Интересно, что на толстой пленке, которая не была запассивирована на всю глубину, отжиг при 350 °С привел к уменьшению средней концентрации

дырок до $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, по-видимому, в результате высвобождения в приповерхностном слое водорода и повторного его захвата марганцем при охлаждении. Были проведены, кроме того, эксперименты по инжекционному отжигу комплексов водорода с акцепторами и донорами. Запассивированные пленки InP(Mn) в течение 1 ч подвергались облучению аргоновым лазером, работавшим в интегральном режиме в диапазоне 0.48—0.51 мкм с мощностью около 100 мВт. Никаких изменений в концентрации акцепторов в образцах обнаружить не удалось. В то же время аналогичное воздействие на подвергнутые водородной пассивации диоды Шоттки Au/n-InP (это были образцы, описанные в [2]) привело практически к полному восстановлению концентрации доноров и к возвращению вольтамперных характеристик к тому виду, который они имели до пассивации (после пассивации наблюдалось заметное улучшение ВАХ таких диодов [2]). Поскольку температура образца при этом не изменялась, эффект может быть однозначно связан с воздействием света либо непосредственно на комплексы, либо через генерируемые носители. Инжекция носителей прямым током $\sim 10 \text{ мА}$ к аналогичному эффекту не приводила.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Pearton S. J., Corbett J. W., Shi T. S. // Appl. Phys. 1986. V. A43. P. 95—153.
- [2] Омеляновский Э. М., Пахомов А. В., Поляков А. Я. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 10. С. 1892—1894.
- [3] Балмашнов А. А., Головановский К. С., Кампс Э. К., Омеляновский Э. М., Пахомов А. В., Поляков А. Я. // Письма ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 24. С. 1486—1489.
- [4] Кузнецов В. П., Омеляновский Э. М., Поляков А. Я., Шепекина Г. В. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1985. Т. 21. В. 12. С. 1760—1765.
- [5] Лошинский А. М., Поляков А. Я., Омеляновский Э. М. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 11. С. 1986—1990.
- [6] Кузнецов В. П., Омеляновский Э. М., Поляков А. Я., Фридман В. А., Шепекина Г. В. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 4. С. 735—737.
- [7] Pantelides S. T. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 50. N 5. P. 995—998.
- [8] Clerjaud B., Cote D., Naud C. // J. Cryst. Growth. 1987. V. 83. P. 190—193.
- [9] Clerjaud B., Cote D., Krause M., Naud C. // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1988. V. 104. P. 421—423.
- [10] Chevallier J., Pesant J. C., Aucuturier M., Rose B., Mircea A. // Program and Abstracts Fifteenth International Conference on Defects in Semiconductors. Budapest, Hungary, 1988. P. 267.

Государственный
научно-исследовательский
и проектный институт
редкометаллической
промышленности
Москва

Получена 1.12.1988
Принята к печати 17.03.1989