

## ВЛИЯНИЕ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА НА ВРЕМЯ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В АНТИМОНИДЕ ИНДИЯ

Летенко Д. Г., Молодцова Е. В., Пахомов А. В.,  
Поляков А. Я., Попков А. Н., Федорцов А. Б., Чуркин Ю. В.

Влияние атомарного водорода на рекомбинационную активность дефектов в антимониде индия исследовано бесконтактным интерференционным методом измерения времени жизни неравновесных носителей заряда. Зарегистрирован существенный (восьмикратный) рост времени жизни в приповерхностных слоях гидрогенизированного  $n$ -InSb. Отмечена крайне высокая по сравнению с другими полупроводниками скорость диффузии водорода в InSb.

В последнее время проводятся широкие исследования водородной пассивации различных дефектов и примесей в полупроводниках типа  $A^{III}B^V$ . Как известно [1], эффект пассивации обусловлен образованием нейтральных комплексов дефект—водород в процессе диффузии атомарного водорода с поверхности полупроводника в его объем. Наименее изученным с этой точки зрения материалом является антимонид индия, которому посвящено лишь небольшое число работ [2, 3]. Это связано с невозможностью применения к InSb традиционных методов гидрогенизации, основанных, как правило, на непосредственном контакте поверхности обрабатываемых пластин с плазмой водорода. Такой контакт сопровождается активным плазменным травлением антимонида индия с образованием летучих гидридов, вследствие которого поверхности пластин покрываются слоем металлического индия, препятствующим диффузии водорода и исключающим возможность проведения какого-либо корректного анализа параметров образцов после обработки [3]. Поэтому для гидрогенизации InSb был использован метод скрещенных пучков, ранее успешно опробованный нами при решении аналогичной проблемы для пассивации фосфида индия [4]. Идея метода скрещенных пучков заключается в создании потока нейтрального атомарного водорода, который в отличие от насыщенной химически активными ионами плазмы практически не причиняет вреда поверхности полупроводника. Поток атомарного водорода создается из потока молекулярного водорода, пересекающего пучок магнитоактивной водородной СВЧ плазмы. В области пересечения происходит диссоциация молекул  $H_2$ , сопровождающаяся образованием как ионов, так и атомов водорода. Однако ионы, удерживаемые магнитным полем, остаются в плазме, и на выходе из области пересечения пучков образуется поток атомарного водорода, который и достигает поверхности образца, расположенной перпендикулярно направлению потока.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании распределения времени жизни неравновесных носителей заряда в гидрогенизированном антимониде индия по глубине и подтверждении данных работы [3] по пассивации атомарным водородом структурных дефектов в InSb.

Исследовались образцы нелегированного InSb, выращенного методом Чохральского,  $n$ -типа проводимости, с концентрацией носителей заряда при 77 К порядка  $10^{14}$  см $^{-3}$ . Концентрация электронов измерялась методом Ван-дер-Пау. Образцы были подвергнуты гидрогенизации методом скрещенных пучков при температуре 100 °С в течение 15 мин. Для измерения времени жизни не-

равновесных носителей заряда  $\tau$  был использован бесконтактный интерференционный метод, предложенный в [5; 6] и доработанный таким образом, чтобы было можно определять времена жизни от глубины проникновения света, генерирующего неравновесные носители в образце. Измерения проводились до и после гидрогенизации.

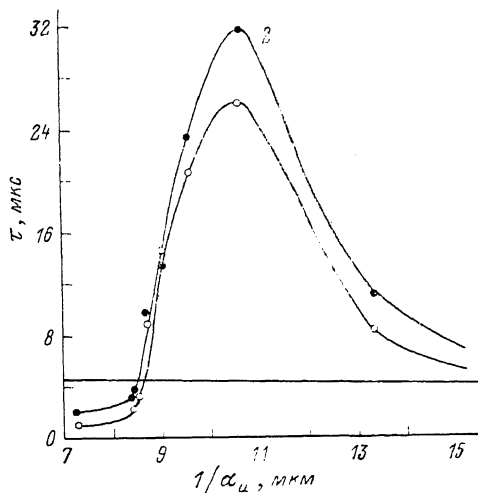
Для того чтобы определить распределение  $\tau$  по глубине образца, в качестве оптического инжектора, генерирующего в образце неравновесные носители заряда, использовался перестраиваемый по длине волны СО-лазер. Такой лазер имеет около 540 линий генерации в диапазоне длин волн от 5.3 до 6.4 мкм, что перекрывает край фундаментального поглощения InSb, в том числе влияние эффекта Бурштейна—Мосса в пределах содержания примесей до  $10^{18}$  см $^{-3}$  и в температурном диапазоне 77—300 К. При перестройке оптического инжектора по длине волны в указанном диапазоне коэффициент поглощения  $\alpha_n$  излучения, генерирующего в InSb неравновесные носители заряда, меняется в пределах  $10^1$ — $10^4$  см $^{-1}$ . Таким образом, в зависимости от длины волны инжектора генерация электронно-дырочных пар в образцах осуществлялась в слоях толщиной от 1 мкм до всего объема образца  $\sim 1.5$  мм.

В качестве оптического зонда нами использовался СО $_2$ -лазер, стабилизированный по длине волны и мощности излучения. Образцы при измерениях помещались в вакуумный оптический криостат оригинальной конструкции. Окна криостата, изготовленные из ВаF $_2$ , были расположены под углом Брюстера по отношению к зондирующему излучению. Это позволило избежать возникновения между окнами криостата и в самих окнах паразитной интерференции зондирующего излучения, искажающей интерференционную картину в исследуемом образце.

В ходе эксперимента измерялась зависимость коэффициента амплитудной модуляции зондирующего излучения  $M$  от величины  $1/\alpha_n$ , характеризующей глубину проникновения света оптического инжектора в образец. Из этой зависимости рассчитывалась, как и в [5; 6], зависимость эффективного значения времени жизни неравновесных носителей заряда  $\tau$  от  $1/\alpha_n$ . Эти зависимости поочередно измерялись при освещении образца оптическим инжектором как с одной, так и с другой стороны образца. Полученные зависимости приведены на рисунке.

Надо отметить, что измеренное время жизни неравновесных носителей в тех же образцах до водородной обработки было равно примерно 4 мкс практически при всех длинах волн инжектора. Из рисунка видно, что после обработки с обеих сторон образца образуется приповерхностный слой, в котором время жизни значительно (в 6—8 раз) превосходит время жизни носителей в объеме образца. Этот слой образуется на глубине от 8 до 15 мкм. При увеличении длины волны излучения оптического инжектора, т. е. при увеличении  $1/\alpha_n$ , неравновесные носители генерируются в области, занимающей все большую часть объема образца, и  $\tau$  при этом стремится, естественно, к объемному значению  $\sim 4$  мкс.

Полученный результат, на наш взгляд, может быть логично объяснен образованием в приповерхностной области InSb слоя, насыщенного водородом. Диффузия водорода в объем InSb сопровождается пассивацией центров рекомбинации. Этот вывод хорошо согласуется с данными более ранней работы [3], авторы которой непосредственно при помощи метода DLTS наблюдали пассивацию



Профили распределения эффективного времени жизни неравновесных носителей в InSb.

Образцы: 1 — исходный, 2, 3 — после гидрогенизации (лицевая и обратная стороны соответственно).

вазию атомарным водородом в объеме InSb электронной ловушки  $E_c - 0.1$  эВ. Этот центр, как известно, в значительной мере определяет рекомбинационные процессы в антимониде индия [7].

Эффективный коэффициент диффузии атомарного водорода в InSb  $D_H$ , оцененный нами из глубины пассивации  $d = 10$  мкм по соотношению  $d = 2 D_H t$ , где  $t$  — время диффузии (15 мин), составил  $2.8 \cdot 10^{-10}$  см<sup>2</sup>/с. Заметим, что полученная величина  $D_H$  относится к всего 100 °С, что примерно на 3 порядка выше скорости диффузии водорода в других полупроводниковых материалах. Так, например, в GaAs при 100 °С  $D_H = 1 \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup>/с [8]. Однако этот нетривиальный результат хорошо согласуется с данными по диффузии водорода в InSb, недавно полученными Р. Вильсоном и др. на Симпозиуме по водородной пассивации в A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> в Триесте (Италия, 1990 г.) [9]. В продолжение настоящей работы мы планируем провести сопоставление профиля  $t = f(1/\alpha_n)$  с диффузионным профилем водорода, измеренным методом масс-спектрометрии вторичных ионов.

Далее, как видно из рисунка, при поверхностной генерации неравновесных носителей ( $1/\alpha_n < 8$  мкм) в образцах, обработанных водородом, наблюдается уменьшение эффективного времени жизни. Этот эффект можно объяснить увеличением скорости поверхностной рекомбинации, связанным с ухудшением состояния поверхности после ее обработки. Подтверждением такого объяснения может служить тот факт, что зависимость  $\tau = f(1/\alpha_n)$ , измеренная в МДП структурах на основе InSb, также подвергавшихся водородной обработке, не обнаруживает спада времени жизни при поверхностной генерации неравновесных носителей заряда (в этих структурах поверхность была защищена слоем диэлектрика).

Наконец, тот факт, что водород проникает в пластину InSb с обеих сторон, наблюдался нами и ранее для GaAs и InP. Объясняется это тем, что при используемом режиме гидрогенизации время, необходимое для достижения атомом водорода обратной стороны обрабатываемой пластины, оказывается существенно меньше «времени жизни» атома, т. е. того времени, по истечении которого данный атом рекомбинирует с другим — атомом в молекулу водорода. Количественные оценки подобных процессов проводились в работе [10].

Таким образом, в настоящей работе независимым оптическим методом были подтверждены данные о пассивации атомарным водородом центров рекомбинации в антимониде индия, ранее полученные в [3] методом DLTS, а также определена толщина слоя пассивации и приведена оценка эффективного коэффициента диффузии атомарного водорода в антимониде индия.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Омеляновский Э. М., Поляков А. Я. // Высокочистые вещества. 1988. № 5. С. 5—19.
- [2] Omeljanovsky E. M., Pakhomov A. V., Polyakov A. Y. // Phys. Lett. 1989. V. A141. N 1-2. P. 75—77.
- [3] Polyakov A. Y., Pakhomov A. V., Tishkin M. V., Popkov A. N., Molodtsova E. V., Kozhukhova E. A., Shlensky A. A., Druzhinina L. V., Omeljanowsky E. M. // Sol. St. Commun. 1990. V. 74. N 8. P. 711—715.
- [4] Omeljanowsky E. M., Pakhomov A. V., Polyakov A. Y. // Semicond. Sci. Techn. 1989. V. 4. P. 947—950.
- [5] Федорцов А. Б., Чуркин Ю. В. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 4. С. 321—324.
- [6] Комаровский К. Ф., Летенко Д. Г., Попов Ю. Г., Федорцов А. Б., Чуркин Ю. В. // Письма ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 8. С. 52—55.
- [7] Laff R. A., Fan H. Y. // Phys. Rev. 1961. V. 121. N 1. P. 53—62.
- [8] Омеляновский Э. М., Пахомов А. В., Поляков А. Я., Говорков А. В., Бородин О. М., Брук А. С. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 7. С. 1203—1207.
- [9] Wilson R. G., Zavada J. M., Novak S. W., Kirschbaum C. // Bookl. Abst. 6 Trieste Semicond. Symp. «Hydrogen in Semiconductors: Bulk and Surface properties». Trieste, 1990. P. 47.
- [10] Balmashnov A. A., Golovanivsky K. S., Omeljanowsky E. M., Pakhomov A. V., Polyakov A. Y. // Contr. papers 20 Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases: Pisa, 1990.