

06.2; 06.3

© 1990

РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНАЯ ФОТОИНЖЕКЦИЯ  
В КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ  
НА ОСНОВЕ СЛОЕВ АМОРФНОГО УГЛЕРОДАВ.В. Слепцов, В.М. Елинсон,  
О.Н. Ермакова, М.Г. Ермаков,  
В.И. Поляков, П.И. Перов,  
Г.Ф. Ивановский

Наиболее реальным путем преодоления принципиальных ограничений в современной микроэлектронике является разработка функциональных приборов на квантовых эффектах, основой которых являются многослойные структуры с квантовыми ямами (*MQW*) [1]. Недостатками существующих *MQW*, а также сверхрешеток (*CP*) являются высокая сложность технологии синтеза и существенное влияние в некоторых случаях диффузионных процессов на термодинамическую стабильность. Особенностью диффузионных процессов является то, что можно изменить скорость их протекания, но принципиально избавиться от них нельзя. Если учесть, что толщина слоев в *CP* составляет десятки ангстрем, то негативное проявление диффузионных процессов очевидно. Поэтому, учитывая уникальные возможности *MQW* и *CP*, несомненный интерес представляет исследование новых принципов их построения.

Одним из перспективных направлений может быть создание многослойных структур, в которых свойства отдельных слоев изменяются в результате структурных переходов без изменения состава. Например, при создании структуры из тонких графитоподобных  $\alpha$ -*C:H<sub>r</sub>* и алмазоподобных  $\alpha$ -*C-H<sub>a</sub>* пленок химический состав фактически сохраняется во всех слоях, а изменяется только фазовый состав. Известно, что фазовый переход происходит скачкообразно и требует существенно большего вклада энергии, чем процессы диффузии, что позволяет обеспечить высокую термодинамическую стабильность таких структур.

В данной работе сообщается о результатах первых исследований *MQW*, содержащих слои аморфного гидрогенизированного углерода ( $\alpha$ -*C:H*) толщиной  $\sim 50$  Å с чередующимися значениями ширины запрещенной зоны (щели подвижности)  $E_{g1}$  и  $E_{g2}$ .

Для описания квантовых эффектов в экспериментальных характеристиках аморфных *MQW* в [2-4] предложено использовать модель энергетических зон в приближении эффективной массы для свободных электронов и дырок, движущихся в одномерном периодическом потенциале, аналогичном потенциалу в квантоворазмер-

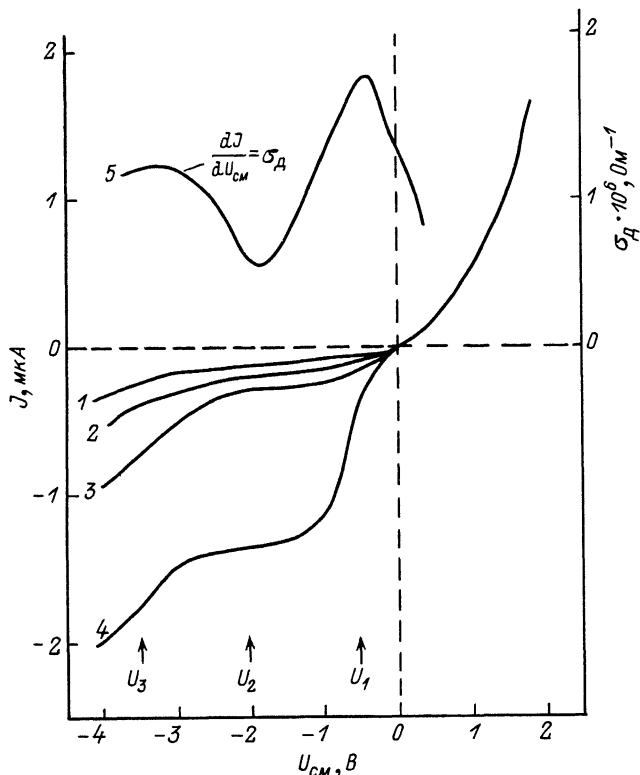


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики однослойной и многослойной гетероструктур  $\alpha-C:H-p-Si$  (КДБ-10). (Интенсивность освещения  $I \sim 0.2$  мВт/см<sup>2</sup>).

ных структурах с монокристаллическими полупроводниковыми слоями. О возможности подобных эффектов в аморфных MQW говорят результаты оптических и электрических измерений на структурах, состоящих из аморфных слоев  $\alpha-Si:H$  и  $\alpha-SiN_x:H$  [2, 5], а также  $\alpha-Si:H$  и  $\alpha-SiC_x:H$  [6].

Исследованные нами структуры были получены последовательным осаждением из направленных ионно-плазменных потоков паров углеводородов и магнетронным осаждением в парах углеводородов слоев  $\alpha-C:H$  с  $E_{g1}$  и  $E_{g2}$  на кремниевые подложки КДБ-10 и ЭКДБ-0.05. Энергия частиц в процессе формирования пленок составляла 0.1–0.6 КэВ. Проводилась предварительная обработка подложек ионами аргона с энергией 1–2 КэВ в течение 10–30 минут. Омический контакт к подложкам изготавливался вжиганием  $In$ , а электрод к верхнему слою  $\alpha-C:H$  – термическим напылением в вакууме полупрозрачного слоя  $Ni$ .

Были исследованы многослойные структуры, содержащие от одной до шести потенциальных ям, образованных слоями  $\alpha$ -C:H. Темновые вольтамперные характеристики (ВАХ) всех исследованных образцов имели типичный для МДП-структур с тонким диэлектриком характер и качественно совпадали с ВАХ структуры с одним слоем  $\alpha$ -C:H (толщиной 50–300 Å). Освещение многослойных структур, полученных осаждением на низкоомные подложки ЭКДБ-0.05, слабо влияло на ВАХ и не вызывало качественных изменений. Однако освещение многослойных структур, полученных осаждением на более высокоомные подложки КДБ-10, приводило к существенной модификации ВАХ и появлению участков резкого изменения дифференциальной проводимости на обратных ветвях. На рис. 1 показано влияние света, поглощаемого в кремниевой подложке КДБ-10, на ВАХ структуры с одним слоем  $\alpha$ -C:H (кривые 1, 2) и многослойной структуры с шестью потенциальными ямами (13 слоев  $\alpha$ -C:H) (кривые 3, 4). Кривая 5 - дифференциальная проводимость многослойной структуры при ее освещении. Особенности в ВАХ, аналогичные приведенным на рис. 1 (кривые 4, 5), появлялись только в структурах с потенциальными ямами и при толщине слоев  $\alpha$ -C:H  $\leq 50$  Å. Понижение температуры и уменьшение фононного рассеяния приводило к усилению немонотонности дифференциальной проводимости при той же освещенности данных структур. Наиболее вероятная природа обнаруженного эффекта - резонансно-туннельная фотоинжекция, т.е. наличие локальных областей туннельной прозрачности для фотоносителей с импульсом, перпендикулярным слоям  $\alpha$ -C:H. На рис. 2 приведен возможный вид зоны проводимости изготовленных MQW при трех напряжениях смещения, соответствующих значениям  $U_1, U_2$  и  $U_3$  вольт-амперной характеристики. Напряжение смещения изменяет изгиб зон в кремниевой подложке, а соответственно и энергетическое распределение разделяемых барьерным электрическим полем фотоносителей у границы раздела Si- $\alpha$ -C:H, в том числе фотоэлектронов с импульсом, перпендикулярным слоям  $\alpha$ -C:H.

Особенности, которые можно объяснить резонансно-туннельной фотоинжекцией, обнаружены также в фотоемкостных характеристиках и кинетике фотоотклика  $V_{\phi}(t)$  при измерении в режиме, близком к режиму холостого хода. В частности, при освещении многослойных структур наблюдалось резкое изменение емкости в области напряжения  $U_1$ , а на переднем фронте кривой  $V_{\phi}(t)$  в случае освещения импульсом света - два практически линейных участка и резкое увеличение производной  $dV_{\phi}(t)/dt$  при переходе от первого ко второму (до выполаживания, связанного с насыщением фотоотклика). Понижение температуры приводило к увеличению немонотонности вольт-емкостной характеристики и резкому уменьшению  $dV_{\phi}(t)/dt$  на первом участке кривой  $V_{\phi}(t)$  при увеличении общей фоточувствительности структур. Данные особенности отсутствовали в аналогичных характеристиках структур с одним слоем  $\alpha$ -C:H на тех же кремниевых подложках.

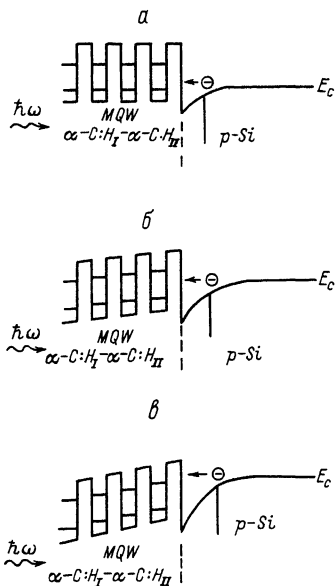


Рис. 2. Зона проводимости исследованных структур с MQW при разных напряжениях смещения  $U_{см}$  (а -  $U_1$ , б -  $U_2$ , в -  $U_3$ ).

Следует отметить, что резонансно-туннельная фотоинжекция не обнаружена при исследовании многослойных структур, полученных осаждением  $\alpha$ -C:H на кремниевые подложки с электронной проводимостью. Возможно, это обусловлено тем, что в  $n$ -Si на границе с  $\alpha$ -C:H формируется противоположный изображенному на рис. 2 изгиб зон и к границе раздела поступают не фотоэлектроны, а фотодырки, которые в процессе резонансного туннелирования практически не участвуют.

Таким образом, впервые продемонстрирована возможность использования аморфного гидrogenизированного углерода для изготовления многослойных структур с квантовыми потенциальными ямами и с квантовыми эффектами в фотоэлектрических характеристиках.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] У э б е р С. // Электроника. 1988. Т. 61. № 20. С. 83-89.
- [2] A b e l e s В., T i e d j e Т. // Phys. Rev. Lett. 1983. V. 51. N 21. P. 2003-2006.
- [3] T i e d j e Т., A b e l e s В., P e r s a n s P.D., B r o o k s B.G., C o d y G.D. // Y. Non-Cryst. Solids. 1984. V. 66. N 1/2. P. 345-350.

- [4] A b e l e s B., T i e d j e T., S t a s i e w s k i H.C., D e c k m a n H.W., P e r s a n s P.D., L i a n g K.S., R o x l o C.D. // Superlattices and Microstructures. 1985. V. 1. N 2. P. 115-118.
- [5] H i r o s e M., M i j a z a k i S. // J. of Non-Cryst. Solids. 1987. V. 97-98. N 1. P. 23-30.
- [6] J i a n g Y.L., H w a n g H.L. // Jap. J. of Appl. Phys. 1988. V. 27. N 12. L2434-L2437.

Поступило в Редакцию  
21 февраля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 10                      26 мая 1990 г.  
06.2; 06.3; 07

© 1990

О ВОЗМОЖНОСТИ СОКРАЩЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ  
ИМПУЛЬСОВ ЗА СЧЕТ КООПЕРАТИВНОГО ЭФФЕКТА  
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРАХ  
С ВНЕШНИМИ РЕЗОНАТОРАМИ

В.А. Ю р е в и ч

Исследования по генерации сверхкоротких импульсов (СКИ) полупроводниковыми инжекционными лазерами приобрели актуальность в последнее время в связи с поиском перспективных путей создания следующего поколения устройств оптической связи с обработки информации с существенно большей скоростью передачи данных. Диапазон длительности СКИ в несколько пикосекунд и доли пикосекунд, достигнутый в ряде работ [1-3], оказывается сравнимым с параметром  $\tau_2$ , соответствующим обратной однородной ширине линии люминесценции, которая по данным [4] для полупроводников на основе *GaAs* составляет величину не менее  $10^{12}$  с<sup>-1</sup>. Высокий уровень усиления, достижимый в этих средах также может свидетельствовать в пользу того, что при генерации СКИ могут проявиться кооперативные процессы излучения. В нашем сообщении показано, что формирование СКИ в полупроводниковом лазере сопровождается эффектом коллективного испускания. Фактором, способствующим проявлению в лазерах с внешними резонаторами этого специфического для сверхбыстрых излучательных процессов механизма эволюции инвертированных систем, является рефракционная нелинейность, присущая полупроводниковым средам [4, 5].

В работах [6, 7] обоснована теоретическая модель взаимодействия резонансного светового поля с оптическим полупроводником,