

УДК 621.315.592

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СВЕРХРЕШЕТОК НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ

Гэн Чунь, Казначеев В. Ю., Юнович А. Э.

Исследована фотолюминесценция аморфных сверхрешеток  $a\text{-Si} : \text{H}/a\text{-SiN}_x : \text{H}$  ( $x=0.3$ ). Показано, что с уменьшением толщины слоя Si сдвигается вверх по энергии не только линия, обусловленная переходами между «хвостами» плотности состояний, но и линия, обусловленная переходами глубокий уровень—хвост валентной зоны. Это явление связывается с квантово-размерным эффектом. Примесь азота влияет на положение линий фотолюминесценции в случае толстых слоев  $a\text{-Si} : \text{H}$ .

*Введение.* Исследования аморфных сверхрешеток (СР) были начаты в 1983 г. [1] и за последние годы привлекли внимание многих лабораторий [2-9]. Изучение структуры СР методами рентгеновской дифракции и электронной микроскопии, оптических и фотоэлектрических свойств СР показали, что одномерный периодический потенциал в СР на основе  $a\text{-Si} : \text{H}$  обуславливает квантово-размерные эффекты. В частности, эти эффекты проявляются в фотолюминесценции (ФЛ) [1, 3, 5-7].

Однако особенности излучательной и безызлучательной рекомбинации в сверхрешетках на основе  $a\text{-Si} : \text{H}$ , а также роль дефектов и состояний на границе раздела и их взаимодействия с атомами водорода, модели энергетического спектра аморфных СР изучены недостаточно. Результаты различных авторов противоречивы. В настоящей работе изложены результаты исследований ФЛ СР  $a\text{-Si} : \text{H}/a\text{-SiN}_x : \text{H}$  ( $x=0.3$ ), в которых проявляется влияние квантово-размерных эффектов на спектры. В частности, важно влияние этих эффектов на глубокие уровни дефектов; обсуждается и возможная роль примеси азота в слоях  $a\text{-Si} : \text{H}$ .

### 1. Изготовление образцов и их структурный анализ

Образцы СР были выращены методом напыления в тлеющем разряде в лабораториях Китайского Университета Науки и Технологии (КУНТ, г. Хэфей, КНР).<sup>1</sup> Давление в камере выращивания было около  $10^{-3}$  мм рт. ст., расход  $\text{SiH}_4$  около 5 мл/мин; толщина слоев  $a\text{-Si} : \text{H}$  варьировалась от 10 до 80 Å, слоев  $a\text{-SiN}_x : \text{H}$  ( $x=0.3$ ) была 40 Å, число периодов СР от 60 до 40. Подложкой для СР служил кварц. Для сравнения были выращены сравнительно толстые слои  $a\text{-Si} : \text{H}$  и  $a\text{-SiN}_x : \text{H}$  (см. таблицу). Толщины слоев были рассчитаны из технологических условий, для одного образца для контроля были проведены структурные исследования, подтвердившие правильность расчета толщины.

На рис. 1 показаны спектр рентгеновской дифракции и фотография, сделанная в просвечивающем электронном микроскопе. В зависимости интенсивности дифрагированного пучка от угла наблюдается три дифракционных максимума; это свидетельствует о хорошей периодичности СР, для которой толщина пары

<sup>1</sup> Выращивание проводилось аспирантом Гэн Чунем на установке профессора У. Цендя.

№ образца	Толщина слоя $a\text{-Si}$ , $\text{Å}$	Толщина слоя $a\text{-SiN}_x$	Число периодов	Подложка
31	15	40	60	Si, кварц
32	25	40	60	Si, кварц
33	40	40	60	Si, кварц
34	50	40	60	Si, кварц
35	80	40	40	Si, кварц
37	2300			Si, кварц
38		2400		

слоев, периода, может быть рассчитана по формуле  $D = (\lambda/2) / (\sin \theta_{k+1} - \sin \theta_k) = 1.54 \text{ Å}$ . На фотографии также наблюдается хорошая периодичность слоев, из которой можно сделать оценку идеальности поверхностей раздела: размытость

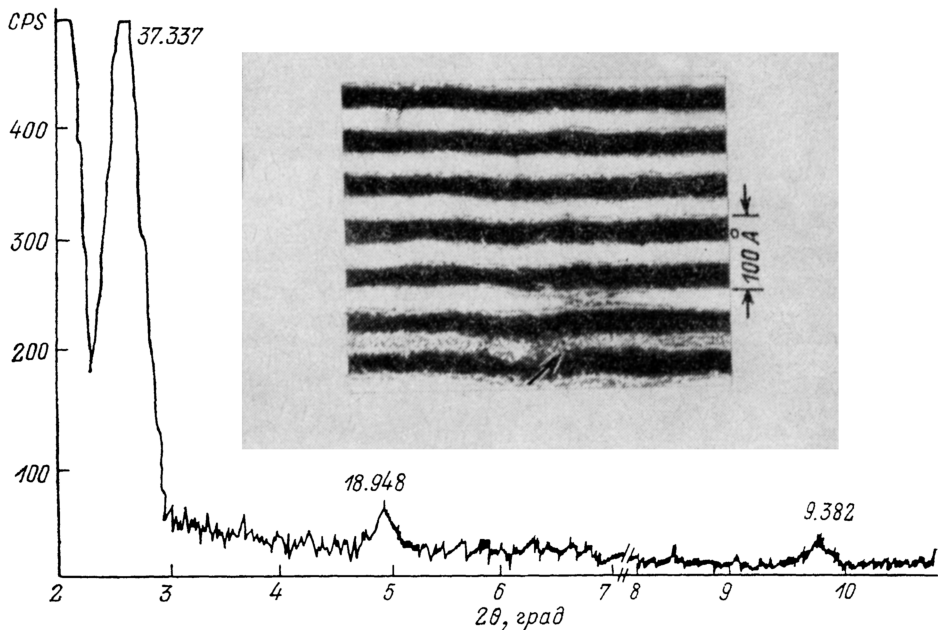


Рис. 1. Спектр рентгеновской дифракции (кривые качания) для образца сверхрешетки  $a\text{-Si} : \text{H}/a\text{-SiN}_x : \text{H}$  (31 в таблице).

На вставке — фотография этого образца, сделанная в просвечивающем электронном микроскопе; стрелкой указан дефект.

и негладкость границы около  $2 \text{ Å}$ . На фотографии можно наблюдать дефекты, прорастающие от границы с подложкой на несколько слоев CP. Оже-спектры подтвердили размеры слоев и их периодичность, а также состав нитрида кремния ( $x=0.3$ ).

## 2. Спектры фотолюминесценции и их обсуждение

Спектры ФЛ исследовались на установке, которая включала возбуждающий аргоновый лазер ЛГИ-503 [ $\lambda=488 \text{ нм}$ ,  $W_0=(0.5 \div 1.0) \text{ Вт/см}^2$ ], монохроматор МДР-1 с фотоумножителем ФЭУ-62 и схему счета фотонов; отношение сигнал/шум для характерных спектров было более 15. Большая часть опытов проводилась при температуре  $T=110 \div 115 \text{ К}$ , при увеличении температуры интенсивность люминесценции резко падала, так что лишь для некоторых образцов удалось исследовать спектры вплоть до комнатной температуры.

На рис. 2 показан характерный спектр ФЛ при  $T=115 \text{ К}$  для одного из образцов со сравнительно малой толщиной слоев  $d$  (см. таблицу). В спектре

наблюдается две полосы с максимумами вблизи  $\hbar\omega_1=1.35$  и  $\hbar\omega_2=1.05$  эВ. Интенсивность более длинноволновой полосы существенно увеличивалась с уменьшением  $d$  от 80 до 15 Å.

На рис. 3 представлена зависимость положения максимумов от толщины  $d$  ( $a$ -Si). Важно, что с уменьшением толщины наблюдается увеличение энергии в максимуме для обеих полос: и  $\hbar\omega_1$ , и  $\hbar\omega_2$ . Это увеличение наблюдается для толщин, меньших 40 Å. Во всех образцах не наблюдалось линий и полос, которые могли бы происходить вследствие рекомбинации в широкозонных слоях  $a$ -SiN<sub>x</sub>.

Механизмы рекомбинации, обуславливающие наблюдаемые полосы в спектрах, показаны на рис. 4. В соответствии с известными моделями рекомбинации в  $a$ -Si [10], полоса может быть описана как излучательные переходы электронов между хвостами плотности состояний вблизи краев зон проводимости и валентной в щели подвижности аморфного кремния, а полоса  $\hbar\omega_2$  — как излучательные переходы из глубоких уровней на состояния в хвосте валентной зоны.

Если сдвиг полос с уменьшением толщины  $d$  обусловлен квантово-размерными эффектами, то для оценки можно рассчитать сдвиг края эффективной запрещенной зоны в непрерывном спектре вследствие размерного квантования по модели Кронига—Пенни [9, 11]. Если принять эффективные массы в зонах проводимости и валентной равными  $m_c^*=0.6 m_0$  и  $m_v^*=1.0 m_0$  [6], а барьеры в слоях широкозонного полупроводника непроницаемыми, то

$$\Delta(\hbar\omega) = \Delta E_c + \Delta E_v = (\pi^2 \hbar^2 d^2 / 2m_0) ((m_0/m_c^*) + (m_0/m_v^*)).$$

При толщинах узкозонных слоев  $d=15 \div 80$  Å оценка сдвигов дает  $\Delta(\hbar\omega) =$

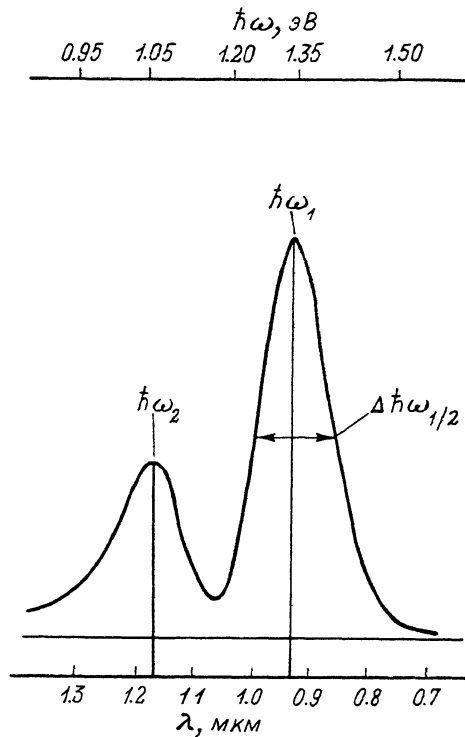


Рис. 2. Характерный спектр фотолюминесценции образца 32 CP  $a$ -Si:H/ $a$ -SiN<sub>x</sub>:H (см. таблицу);  $T=115$  К;  $W_0=1.0$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\Delta\hbar\omega_{1/2}=0.21$  эВ.

$=0.016 \div 0.45$  эВ. Это по порядку величины согласуется с наблюдаемыми сдвигами. Как оправдано применение такой оценки для экспериментально наблюдаемых эффектов? И метод эффективной массы, и модель потенциальной ямы с прямоугольным потенциалом, строго говоря, неприменимы для описания квазинепрерывных по спектру, но локализованных в пространстве состояний в хвостах плотности состояний аморфного полупроводника. То же можно сказать о состояниях электронов на дефектах с глубокими уровнями. Расчеты в более строгих моделях не проводились. Важно, с нашей точки зрения, что для полосы  $\hbar\omega_2$ , обусловленной дефектами, сдвиг наблюдается, когда толщина  $d$  становится сравнимой с вероятными размерами дефекта порядка нескольких межатомных расстояний.

Происхождение дефектов, обуславливающих полосу  $\hbar\omega_2$ , связано, по-видимому, с границами раздела. На это указывает увеличение интенсивности полосы с уменьшением  $d$ , большая интенсивность полосы в образцах с подложкой из кварца, чем с подложкой из Si.

Кроме квантово-размерных эффектов, следует отметить и возможное влияние примеси азота в слоях  $a$ -SiN<sub>x</sub>. На рис. 3 вместе с нашими результатами по-

казаны результаты работ [2, 6], в которых также наблюдался сдвиг  $\Delta\hbar\omega_1$  в коротковолновую сторону при уменьшении  $d$  ( $a\text{-Si} : \text{H}$ ). Видно, что с увеличением количества азота в барьере от  $x=0.3$  до  $x=1.5$  линия в толстых слоях  $a\text{-Si} : \text{H}$  существенно сдвигается вверх по энергии.

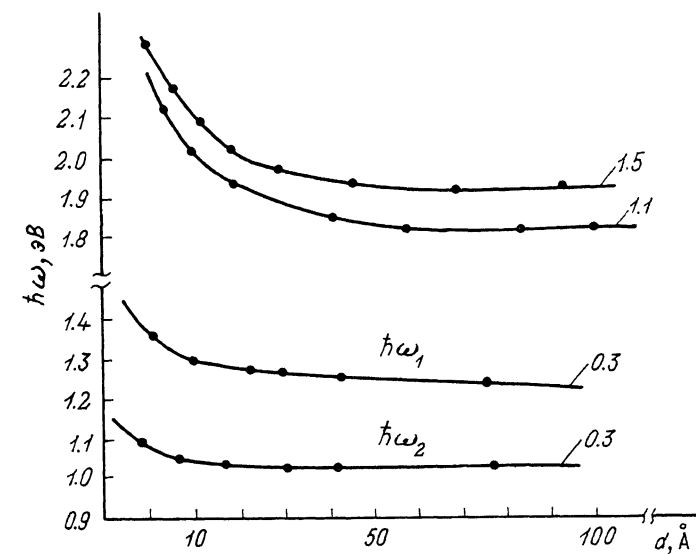


Рис. 3. Зависимость положения максимумов в спектрах CP  $a\text{-Si} : \text{H}/a\text{-SiN}_x : \text{H}$  от толщины слоя аморфного кремния.

Верхние кривые — из работ [2] и [6] для полосы  $\hbar\omega_1$ . Числа у кривых — значения  $x$ .

**Выводы.** Таким образом, показано, что с уменьшением толщины слоя  $d$  менее  $40 \text{ \AA}$  в спектрах люминесценции аморфных сверхрешеток  $a\text{-Si} : \text{H}/a\text{-}$

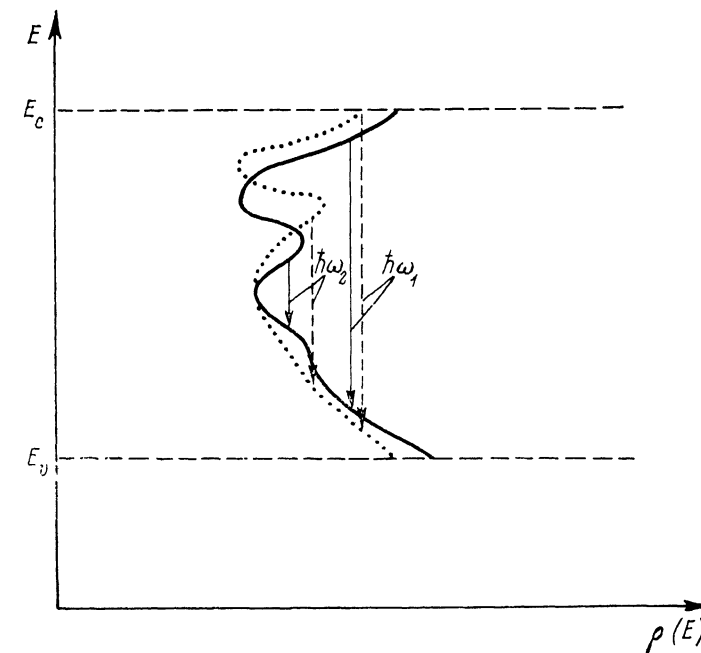


Рис. 4. Гипотетическая схема изменения плотности состояний и энергии излучательных переходов в  $a\text{-Si} : \text{H}$  без сверхрешетки (сплошная линия) и со сверхрешеткой (пунктир).

$\text{SiN}_x : \text{H}$  сдвигается вверх по энергии не только линия  $\hbar\omega_1$ , обусловленная переходами между хвостами плотности состояний, но и линия  $\hbar\omega_2$ , обусловленная

переходами с глубокими уровнями в хвост валентной зоны. Это может быть объяснено квантово-размерными эффектами. Влияние примеси азота сказывается на положении линии  $\hbar\omega_1$  для толстых слоев  $a$ -Si : H.

Авторы выражают благодарность У Це-Цину, У Це-Циану, Лю Хунту (КУНТ) за помощь в изготовлении образцов, И. П. Звягину, А. Г. Казанскому и И. А. Куровой за обсуждение результатов.

#### Список литературы

- [1] Abeles B., Tiedje T. // Phys. Rev. Lett. 1983. V. 51. N 2. P. 2003—2008.
- [2] Tiedje T., Abeles B., Persans P. D., Brooks B. G., Gody G. D. // J. Non-Cryst. Sol. 1984. V. 66. P. 345—349.
- [3] Tiedje T., Abeles B., Brooks B. G. // Phys. Rev. Lett. 1985. V. 54. N 23. P. 2545—2548.
- [4] Ibaraki K., Fritzsche H. // Phys. Rev. B. 1984. V. 30. N 15. P. 5791—5794.
- [5] Wang W. C., Fritzsche H. // J. Non-Cryst. Sol. 1987. V. 97-98. P. 919—922.
- [6] Kalem S. // Phys. Rev. B. 1985. V. 37. N 15. P. 8837—8840.
- [7] Kalem S. // Superlatt. a. Microstruct. 1988. V. 3. P. 325—328.
- [8] Cheng, Wen S., Feng J., Fritzsche H. // J. Non-Cryst. Sol. 1985. V. 77-78. P. 1061—1065.
- [9] Morigaki K., Nitta S. // ISSN 0082-4798. Ser. A. N 1056. 1984.
- [10] Morigaki K., Mitta S. // Techn. Rep. of ISSP. 1984.
- [11] Esaki L. // IEEE J. Quant. Electron. 1986. V. QE-22. N 9. P. 1611—1614.

Московский государственный  
университет им. М. В. Ломоносова

Получена 21.09.1990  
Принята к печати 21.03.1991

