

© 1991

ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ В КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИХ АМОРФНЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ Si/SiO₂

Е. А. Виноградов, А. В. Заяц, Д. Н. Никогосян, Ю. А. Репеев

Исследованы спектры ФЛ и ВФЛ короткопериодических ($\leq 20 \text{ \AA}$) сверхрешеток (СР) $a\text{-Si/SiO}_2$ при непрерывном и пикосекундном лазерном возбуждении. Наблюдается существенное увеличение (в $\approx 10^4$ раз) интенсивности примесной люминесценции (2.1 эВ) $a\text{-SiO}_2$ в СР по сравнению с отдельными слоями $a\text{-SiO}_2$, обусловленное переносом возбужденных носителей между слоями СР. Обнаружена люминесценция при переходах между первыми и вторыми подзонами c - и v -зон слоев $a\text{-Si}$ в СР. Релаксация возбужденных носителей между подзонами одной зоны не наблюдается. Обнаружена рекомбинация носителей с участием состояний подзон слоев $a\text{-Si}$ и примесных состояний $a\text{-SiO}_2$. Доказательств влияния квантоворазмерных эффектов на глубокие примесные состояния в $a\text{-SiO}_2$ не обнаружено. Быстрая безызлучательная рекомбинация в слоях $a\text{-Si}$ СР приводит к отсутствию люминесценции этих слоев при непрерывном возбуждении.

Оптические и электрические свойства полупроводниковых сверхрешеток (СР) вызывают большой интерес исследователей [1-4]. Квантоворазмерные эффекты, зависящие от периода СР, приводят к существенным изменениям спектра электронных состояний в таких структурах [4, 5]. Наблюдение люминесценции, обусловленной новыми электронными состояниями, позволяет определить их энергетическое положение без привлечения дополнительных предположений, которые необходимы для получения такой же информации из спектров поглощения и выбор которых неоднозначен [6]. Спектр и интенсивность люминесценции СР, время жизни возбужденных носителей определяются как ограничением разрешенных зон носителей, так и взаимодействием между электронными состояниями соседних слоев, образующих СР [4]. В то же время влияние размерных эффектов на энергетическое состояние дефектов в слоях СР и излучательная рекомбинация с их участием изучены слабо. Это связано с тем, что у большинства СР (например, на основе соединений A^3B^5 или $a\text{-Si} : \text{H/SiN} : \text{H}$ и др.) разница между запрещенными зонами слоев, образующих потенциальную яму и потенциальный барьер, сравнима с величинами этих запрещенных зон и примесные состояния слоев, имеющие малую плотность в сравнении с зонными состояниями, играют в этих условиях незначительную роль в определении оптических свойств СР. Ситуация совершенно меняется для СР $a\text{-Si/SiO}_2$. Глубина одномерного потенциала, создаваемого в такой СР чередованием слоев, $\Delta E = E_g(a\text{-SiO}_2) - E_g(a\text{-Si}) \approx 7$ эВ значительно превосходит ширину запрещенной зоны $a\text{-Si}$ (≈ 0.9 эВ), образующего потенциальные ямы в СР. Поэтому для таких СР зонные состояния $a\text{-SiO}_2$ не играют роли и на первый план могут выйти примесные состояния $a\text{-SiO}_2$, плотность состояний которых мала, но энергетическое положение близко к состояниям зон $a\text{-Si}$. Из-за малой плотности примесные состояния могут быть не видны в спектрах поглощения и отражения на фоне междузонных переходов в $a\text{-Si}$, но проявляться в люминесценции.

Величина модуляции потенциала ΔE в аморфных СР Si/SiO₂ в несколько раз превосходит энергию образования дефектов в кристаллическом кремнии и кварце. Поэтому при кристаллизации α -Si/SiO₂ с ультратонкими слоями должно возникнуть новое вещество с кристаллической структурой, определяемой одномерным потенциалом СР [7, 8]. В связи с этим особое внимание привлекают исследования электронной структуры и свойств короткопериодических (≤ 20 Å) СР α -Si/SiO₂. Влияние квантоворазмерных эффектов приводит в таких СР к возникновению в спектре разрешенных состояний α -Si k -подзон ($k=0, 1, 2, \dots$) зоны проводимости и валентной зоны, так что поглощательные междузонные переходы происходят между состояниями одинаковых ($\Delta k=0$) подзон c - и v -зон [8-10].

В данной работе изучаются аморфные сверхрешетки Si/SiO₂, в которых толщина слоев α -SiO₂ составляет 4 монослоя, а толщина α -Si меняется от 2 до 8 монослоев. Исследование спектров фотолюминесценции (ФЛ) при непрерывном и импульсном возбуждении и спектров возбуждения фотолюминесценции (ВФЛ) дает сведения о зонной и примесной электронной структуре СР и каналах релаксации возбужденных носителей, а сравнение спектров ВФЛ различных полос и поглощения СР — о характере взаимодействия между слоями сверхрешетки.

1. Эксперимент

Исследовавшиеся СР (см. таблицу) изготавливались методом высококачественного магнетронного распыления поочередно мишеней аморфных SiO₂ и Si в спектрально-чистом аргоне на подложки из кремния КЭФ-4, 5 ориентации (100) или (111). Толщина слоев СР, периодичность и качество слоев контролировались методами профильной Оже-спектроскопии и электронной микроскопии [7, 8]. Для сравнения изучалась ФЛ α -SiO₂ толщиной 1000 Å, изготовленных тем же методом на таких же подложках, что и СР.

Параметры сверхрешеток α -Si/SiO₂

Номер образца	Толщина слоев Si, Å	Толщина слоев SiO ₂ , Å	Полная толщина СР, Å
1	2.7	10	1143
2	5.5	10	775
3	8.2	10	910
4	11	10	1050

Спектры ФЛ СР исследовались при непрерывном и импульсном возбуждении. Для непрерывного возбуждения использовались аргон-криптоновый (длина волны возбуждения 647, 514.5 и 488 нм) и гелий-кадмиевый (441 нм) лазеры. Измерения проводились при комнатной температуре и температуре жидкого гелия.

Спектры ФЛ и ВФЛ при пикосекундном лазерном возбуждении снимались следующим образом. Излучение второй гармоники (532 нм, 10 мДж, 37 ± 2 пс) Nd : YAG лазера, работающего в режиме пассивной синхронизации мод и генерирующего одиночные пикосекундные импульсы, направлялось в генератор параметрической сверхлюминесценции (ПСЛ), состоящий из двух кристаллов DKDP, вырезанных в направлении $\theta=45^\circ$, $\varphi=0^\circ$. Для генерации излучения ПСЛ использовалось трехволновое взаимодействие по типу $e-oe$ [11]. При синхронном вращении обоих кристаллов DKDP (интервал углов поворота 26°) длина генерируемой волны ПСЛ с обыкновенной поляризацией изменялась в пределах 740—1200 нм, а с необыкновенной поляризацией — в пределах 960—1890 нм. Энергия импульсов обыкновенной волны в диапазоне длин волн 800—1000 нм составляла около 1 мДж. Для удвоения частоты излучения ПСЛ использовался набор кристаллов LiIO₃ с углами среза от 20 до 45° . Таким образом,

генерировались пикосекундные (~ 20 пс) импульсы света, длина волны которых могла непрерывно изменяться 1890 до 370 нм. Энергия импульсов для наиболее часто используемых длин волн (450 и 580 нм) была ≈ 0.1 мДж.

В качестве спектрального прибора использовался дифракционный монохроматор МДР-3. Для регистрации ФЛ в разных диапазонах спектра применялись фотоумножители ФЭУ-62 и ФЭУ-78. При импульсном возбуждении проводилось усреднение сигнала ФЛ по 20 импульсам, интенсивность которых попадала в заданный интервал (учитывались только те импульсы, для которых энергия накачки параметрического генератора была от 9 до 11 мДж). Спектры возбуждения ФЛ нормировались с учетом спектральной зависимости энергии импульсов возбуждающего света.

2. Экспериментальные результаты

1) Люминесценция при непрерывном возбуждении. Спектры ФЛ исследуемых СР при непрерывном возбуждении представлены на рис. 1. В других спектральных диапазонах вплоть до 1.1 эВ люминесценция при непрерывном возбуждении не обнаружена.

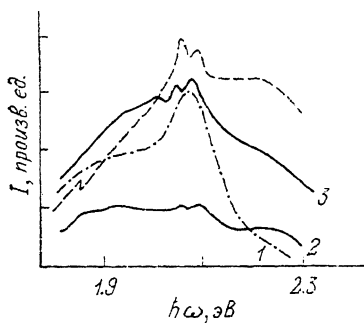


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции СР при непрерывном возбуждении $\lambda_B=488$ нм. СР-1 при $T=4.2$ К (1), СР-4 при $T=300$ (2) и 4.2 К (3); $a\text{-SiO}_2$ при $T=300$ К (штрихи — интенсивность $\cdot 10^4$).

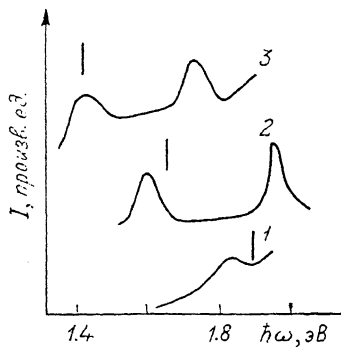


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции СР при пикосекундном возбуждении СР-1 при $\lambda_B=580$ нм (1). СР-2 при $\lambda_B=600$ нм (2), СР-3 при $\lambda_B=580$ нм (3). $T=300$ К.

Стрелки показывают положение подзоны $k=0$ в СР.

И при комнатной, и при гелиевой температурах проявляются широкие бесструктурные полосы ФЛ. Интенсивность люминесценции слабо зависит от температуры образцов: при охлаждении от 300 до 4.2 К увеличивается в 3—4 раза. Перераспределение формы полосы ФЛ при этом незначительное, хотя относительная интенсивность длинноволнового и коротковолнового крыльев уменьшается.

Спектр ФЛ зависит от длины волны возбуждающего света, но во всех случаях интенсивность свечения слабая. При возбуждении светом 514.5 нм интенсивность ФЛ всех СР уменьшается в 2—3 раза по сравнению с возбуждением 488 нм. При более коротковолновом возбуждении 330 нм и более длинноволновом 647 нм люминесценция не была зарегистрирована. Коэффициенты поглощения СР на этих длинах волн отличаются слабо [9], поэтому зависимость интенсивности ФЛ от $\lambda_{\text{возб}}$ не может быть объяснена изменением поглощения.

Спектральные зависимости ФЛ сверхрешеток аналогичны ФЛ плавяного кварца в этой области спектра (рис. 1), но интенсивность люминесценции СР в $\sim 10^4$ раз больше, чем в $a\text{-SiO}_2$.

2) Люминесценция при пикосекундном возбуждении. В отличие от непрерывного возбуждения спектр ФЛ СР при пикосекундном возбуждении значительно богаче (рис. 2, 3).

Но возможность наблюдения тех или других полос ФЛ очень сильно зависит от энергии квантов возбуждения. При длинноволновом возбуждении светом 580 нм наблюдается ряд полос ФЛ (рис. 2), спектральное положение которых соответствует энергетическому расстоянию между ближайшими подзонами ($k=0$), возникающими из-за пространственного квантования в зоне проводимости и валентной зоне слоев a -Si [9]. При уменьшении периода СР эти линии ФЛ сдвигаются в длинноволновую сторону относительно положения края подзон. Для СР-2 и СР-4 обнаружены также полосы ФЛ, расположенные внутри первой подзоны пространственного квантования, где особенностей в спектре поглощения не было обнаружено.

Переход к возбуждению светом 450 нм (вблизи $\lambda_{\text{возб}}$ непрерывного возбуждения 480 нм) приводит к исчезновению всех наблюдаемых ранее полос (рис. 3). Спектр ФЛ при этом становится похожим на спектр непрерывной люминесценции, но в отличие от него, кроме люминесценции слоев

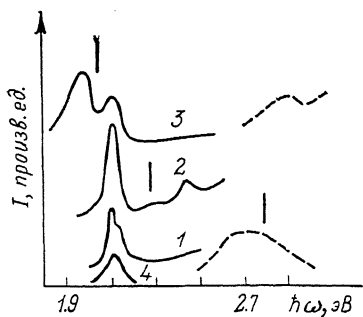


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции СР при пикосекундном возбуждении 450 (сплошная линия) и 370 нм (штрихи). СР-1 (1), СР-2 (2), СР-3 (3) и a -SiO₂ (4 — интенсивность $\cdot 10^4$). $T=300$ К.

Стрелки показывают положение подзоны $k=1$ в СР.

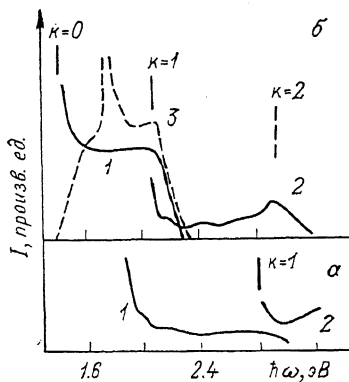


Рис. 4. Спектры возбуждения фотолюминесценции для СР-1 при 1.83 (1) и 2.78 эВ (2) (а); для СР-3 при 1.42 (1), 1.97 эВ (2) и 1.74 эВ (3) (б).

Стрелки показывают положение подзон в СР.

плавленого кварца, наблюдаются и другие линии. Для образца 2 наблюдаются полосы ФЛ вблизи края и внутри второй ($k=1$) подзоны (аналогично, как и для первой подзоны на рис. 2). Для СР-3 полоса ФЛ вблизи края второй подзоны значительно сдвинута в длинноволновую сторону в отличие от ФЛ из первой подзоны. В спектре ФЛ СР-1 и СР-3 кварцевая полоса ≈ 2.1 эВ имеет коротковолновое плечо.

При еще более коротковолновом возбуждении 370 нм (рис. 3) в спектре СР-1 есть только одна широкая полоса ФЛ вблизи края второй подзоны a -Si, образец СР-2 не люминесцирует, а для СР-3 наблюдается широкая линия вблизи 2.9 эВ, природа которой будет выяснена ниже.

3) Возбуждение фотолюминесценции. Как было показано в разделе 2.2, наблюдение некоторых линий люминесценции возможно только при определенных энергиях кванта возбуждающего света. (В то время как в объемных полупроводниках при межзонном возбуждении проявляются все линии ФЛ). В связи с этим интересно исследование спектров возбуждения ФЛ.

Оказывается, что линии люминесценции, спектральное положение которых коррелирует с положением краев ближайших подзон a -Si в СР, возбуждаются светом, который поглощается при электронных переходах между этими подзонами (рис. 4; спектры ВФЛ для СР-2 не показаны, так как их характер абсолютно аналогичен описываемому). При увеличении энергии фотонов возбуждения, когда начинается поглощение при переходах между следующими подзонами ($k=1$), люминесценция, связанная

с переходами между подзонами $k=0$, исчезает, но в спектре появляются новые полосы, положение которых определяется краем подзон $k=1$. Дальнейшее уменьшение длины волны возбуждения приводит к повторению ситуации при достижении края следующей подзоны $k=2$.

Исследование возбуждения линий ФЛ, не коррелирующих с особенностями спектра электронных состояний слоев α -Si, а расположенных по энергии внутри первой или второй подзоны, показывает, что коротковолновый край спектра возбуждения точно совпадает со спектром возбуждения межподзонной люминесценции для подзон, внутри которых эти линии находятся (рис. 4). Полосы ФЛ 1.98 эВ в СР-2 и 1.74 эВ в СР-3, расположенные внутри подзон $k=0$, интенсивно возбуждаются в антистоксовой области, причем длинноволновая граница определяется краем этих нижайших подзон. В то же время линии внутри второй подзоны ($k=1$) не имеют антистоксовой компоненты возбуждения.

На рис. 5 представлены спектры ВФЛ полосы, наблюдаемой при пикосекундном и непрерывном возбуждении как в СР, так и в отдельных слоях α -SiO₂. В плавленом кварце эта линия имеет пик возбуждения вдали от люминесцентных переходов и не возбуждается резонансно. Спектр возбуждения этой ФЛ в СР-3 похож по форме на предыдущий в коротковолновой области спектра, но наблюдается возбуждение вблизи линии ФЛ. В СР-1 спектр возбуждения аналогичен скорее ВФЛ полос, рассмотренных выше, он имеет антистоксову компоненту и определяется поглощением при переходах между состояниями подзоны $k=0$. Соотношение между интенсивностями ВФЛ соответствует наблюдавшемуся для интенсивности ФЛ СР и α -SiO₂.

3. Обсуждение результатов

Исследование спектров люминесценции и ее возбуждения в аморфных сверхрешетках Si/SiO₂ и в отдельных слоях плавленого кварца и сравнение их со спектром электронных состояний СР позволяют разделить все наблюдаемые полосы ФЛ на три группы: линии ФЛ, наблюдаемые как в СР, так и в слоях α -SiO₂; линии ФЛ, обусловленные переходами между подзонами пространственного квантования в слоях α -Si в СР; линии ФЛ, расположенные внутри этих подзон.

После возбуждения электрона (дырки) в СР возможны следующие процессы релаксации его энергии: термализация посредством испускания фононов в подзоне, возникающей из-за пространственного квантования, в которую он возбудился [1²]; термализация между подзонами при испускании как фононов, так и света [1³]; переход возбужденных носителей в соседний слой СР и дальнейшая релаксация в этом слое [4]; наконец, излучательная и безызлучательная рекомбинация. Если переходы между соседними слоями не происходят, то спектр возбуждения люминесценции должен отражать спектр поглощения СР. Таким образом, наблюдаемые спектры ФЛ и ВФЛ определяются соотношением между временем, необходимым для выхода из слоя или захвата носителей в слое СР, и временем, необходимым для релаксации (внутри и между подзоной) до энергии, при которой возникает люминесценция.

Как мы видели, линии ФЛ, соответствующие краям подзон слоев α -Si в СР, наблюдаются только при возбуждении носителей в эту же подзону (рис. 4). Это говорит об отсутствии релаксации между разными подзонами зоны проводимости и валентной зоны α -Si в исследуемых СР. Обычно из-за термализации возбужденных носителей в люминесценции проявляются только нижние состояния электронного спектра. Слабая межзональная релаксация возбужденных носителей в α -Si/SiO₂ позволяет наблюдать ФЛ также из верхних подзон носителей.

Коротковолновый спад спектра ВФЛ линии 1.97 эВ, обусловленной подзонами $k=1$ в СР-3, определяется, по-видимому, аналогично спектрам возбуждения межподзонных переходов $k=0$ и $k=1$ в СР-1, СР-2 и СР-3, краем следующей подзоны $k=2$ в СР-3. Это коррелирует с появлением

в спектре ФЛ СР-3 линии 2.9 эВ, проявляющейся при возбуждении выше этого края (рис. 3). Таким образом, эта линия ФЛ быть приписана переходам из подзоны $k=2$ a -Si в СР-3. Положение этой подзоны не было определено ранее при исследовании поглощения, так как она расположена за пределами спектрального диапазона λ -поглощения [9].

На спектры возбуждения рассматриваемых линий в области, где существенны электронные переходы в слоях a -SiO₂ (ср. рис. 3, 4, 5), влияют процессы перехода электронов между слоями, что приводит к отклонениям спектра ВФЛ от спектра поглощения СР. В то же время в спектральном интервале, где такого переноса нет ($\hbar\omega < 2.0$ эВ), спектральный ход ВФЛ отражает спектр поглощения, обусловленный переходами между подзонами a -Si. Безызлучательные переходы в слоях a -Si приводят только к отличиям интенсивности ВФЛ и поглощения.

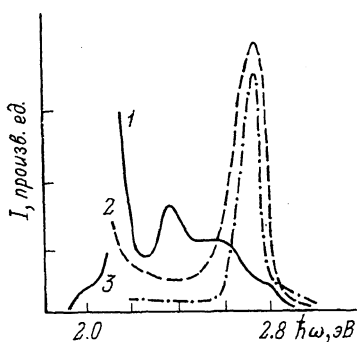


Рис. 5. Спектры возбуждения фотолюминесценции при 2.1 эВ для СР-1 (1), СР-3 (2) и a -SiO₂ (3 — интенсивность $\cdot 10^3$). $T=300$ К.

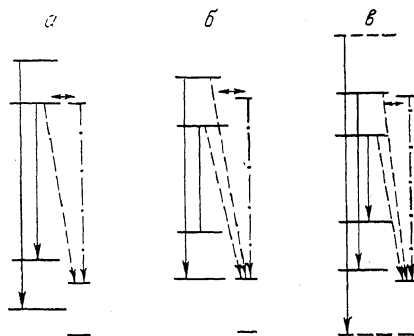


Рис. 6. Схема электронных состояний и излучательных переходов в СР-1 (а), СР-2 (б) и СР-3 (в).

Разрывы s - и v -зон a -Si и a -SiO₂ принимаются не зависящими от периода СР. Положение краев подзон слоев a -Si взято из [9]. Край подзоны $k=2$ (штрихи) определен в этой работе. Горизонтальные стрелки показывают процессы переноса электронов между слоями СР.

Наблюдаемые полосы ФЛ имеют затянутый длинноволновый хвост и большую ширину ~ 0.1 эВ (по сравнению с тепловой шириной, которую следует ожидать для «идеальных» межподзонных переходов). Это свидетельствует об участии состояний в хвостах подзон в процессах рекомбинации. При уменьшении периода СР длинноволновое крыло этих полос ФЛ все более растет, по-видимому, из-за увеличения плотности локализованных состояний в хвостах разрешенных зон при разупорядочивании слоев кремния в короткопериодических СР [10, 14].

Линия ФЛ, проявляющаяся при непрерывном и при импульсном возбуждении a -SiO₂, обусловлена, как считается, фоновыми примесями Ge в плавленом кварце [15]. Возбуждение этой люминесценции в отдельных слоях a -SiO₂ малоэффективно, так как энергия квантов возбуждения более чем в три раза меньше ширины запрещенной зоны a -SiO₂ и при возбуждении имеют место переходы только между примесными состояниями. То, что рассматриваемая ФЛ не возбуждается резонансно в a -SiO₂, а пик ВФЛ сдвинут на 0.7 эВ в коротковолновую сторону, говорит в пользу трехуровневой схемы переходов, причем в отсутствие возбуждения заполнен только один нижний уровень. Маловероятно, что большой стоксов сдвиг 0.7 эВ возникает из-за релаксации центров ФЛ после возбуждения, объяснение других особенностей спектров ФЛ и ВФЛ СР (например, наличие антистоксового сдвига в ВФЛ некоторых полос) также требует трехуровневой схемы.

Таким образом, свет возбуждения поглощается в слоях a -Si в СР, после чего возбужденные носители могут переходить на примесные состоя-

ния в соседних слоях $a\text{-SiO}_2$ и там рекомбинируют. (Эффект, обратный резонансному переходу носителей между зонными состояниями разных слоев сверхрешетки GaAs/AlGaAs [4, 16]). Вероятность такого перехода между состояниями соседних слоев сверхрешетки зависит от их взаимного энергетического положения и поэтому изменяется при изменении толщины слоев из-за размерного квантования. При изменении длины волны возбуждения меняется начальная энергия носителей в подзонах, которая влияет на условие резонансного перехода [4], и интенсивность ФЛ меняется. В CP-1 возбуждение примесной ФЛ происходит во всей первой подзоне разрешенных состояний $a\text{-Si}$ (рис. 5). Примесный уровень $a\text{-SiO}_2$ находится вблизи дна подзоны c -зоны $a\text{-Si}$ (рис. 6). Так что возбуждение электрона в эту подзону и последующая его термализация приводят к возникновению энергетических условий для резонансного переноса на примесные состояния в соседнем слое $a\text{-SiO}_2$. Излучательный переход происходит на пустые примесные состояния, как и в отдельных слоях $a\text{-SiO}_2$. Наличие в спектре ВФЛ антистоксовой компоненты подтверждает, что эти состояния свободные. Из-за того что нет релаксации возбужденных носителей между разными подзонами $a\text{-Si}$, когда начинается поглощение с участием следующей подзоны, условия переноса перестают выполняться и примесная ФЛ не проявляется в спектрах. Наличие резонансного ВФЛ и особенности вблизи 2.4 эВ в спектре возбуждения обусловлено тем, что при этих энергиях поглощаемого фотона увеличивается скорость освобождения состояний нижнего уровня после рекомбинации из-за резонансного перехода дырок из соседних слоев $a\text{-Si}$ и поглощательных переходов с этого уровня в c -подзоны $k=0$ и 1. Возбуждение из-за примесного поглощения $a\text{-SiO}_2$ в CP-1 не проявляется, так как поглощение в слоях $a\text{-Si}$ на много порядков сильнее и резонансно возбуждается межподзонная ($k=1$) ФЛ, что обуславливает ступеньку вблизи 2.6 эВ в спектре ВФЛ (ср. рис. 3 и 5). В отличие от этого в спектре состояний $a\text{-Si}$ в CP-3 нет особенностей вблизи энергии поглощательных примесных переходов в $a\text{-SiO}_2$ и они видны в спектре ВФЛ благодаря своей роли в дезактивации нижнего уровня рекомбинации. В CP-3 заселение верхнего примесного уровня $a\text{-SiO}_2$ происходит через состояния подзоны $k=1$ зоны проводимости $a\text{-Si}$ (рис. 6), что и определяет вид спектра ВФЛ.

Как видно из сравнения спектров ФЛ и ВФЛ плавленного кварца и CP, положение линий примесных переходов не зависит от того, в каком материале они наблюдаются. Следовательно, примесные центры в слоях $a\text{-SiO}_2$ не испытывают влияния потенциала CP даже в таких короткопериодических CP. Это связано, по-видимому, с тем, что энергетические состояния глубоких дефектов определяются в основном короткодействующим потенциалом, и благодаря значительной локализации волновой функции электрона состояния таких центров не подвержены влиянию потенциального рельефа.

Спектры ВФЛ полос люминесценции третьего типа, расположенных между полосами межподзонной рекомбинации, похожи на спектры ВФЛ как примесной, так и межподзонной рекомбинации. Эта люминесценция возбуждается светом из всей области поглощения подзоны, внутри которой она расположена по энергии. Наличие антистоксовой компоненты в этом спектре дает основание связать эти излучательные переходы с примесными уровнями $a\text{-SiO}_2$, которые не заполнены в равновесии. Схема уровней, предложенная выше (рис. 6), позволяет объяснить эту ФЛ переходами электронов, термализованных в подзонах пространственного квантования в слоях $a\text{-Si}$, на примесные состояния в барьерных слоях $a\text{-SiO}_2$ в CP. Справедливость предложенной модели подтверждается тем, что линии такой кросс-люминесценции, на первый взгляд отсутствующие в спектрах ФЛ CP-1 и для второй подзоны CP-3, согласно схеме рис. 6, должны находиться вблизи линии примесной ФЛ. В спектре люминесценции CP-1 отчетливо проявляется плечо ~ 2.15 эВ, которое может соответствовать этой кросс-рекомбинации. Широкие полосы ФЛ при 2.1 эВ в CP-3 и при 2.8 эВ в CP-1 обусловлены, по-видимому, суперпозицией линий кросс-

люминесценции из второй подзоны СР и примесной ФЛ в СР-3 и межподзонной ФЛ в СР-1 соответственно.

Быстрая безызлучательная рекомбинация в слоях a -Si, обусловленная, по-видимому, состояниями, возникающими из-за разупорядоченности слоев [8, 10], приводит к тому, что при непрерывном возбуждении проявляется только люминесценция, связанная с состояниями слоев a -SiO₂ в СР. Уменьшение влияния безызлучательной релаксации носителей в слоях a -Si при пикосекундном возбуждении дает возможность наблюдать межподзонную и кросс-люминесценции, связанные с состояниями подзон слоев a -Si.

Вернемся теперь к полосам ФЛ, рассмотренным нами ранее. Предложенная схема электронных состояний СР дает объяснение наблюдаемым сдвигам линий, обусловленных межподзонными переходами в a -Si, по отношению к положению края этих подзон (рис. 2, 3). По-видимому, это вызвано взаимодействием состояний носителей разных слоев СР. Подзоны a -Si $k=0$ в СР-3 и $k=1$ в СР-1 и СР-2 находятся по энергии вдали от примесных состояний слоев a -SiO₂, и сдвиг линий ФЛ, связанных с этими подзонами, незначителен. При сближении энергетических положений краев подзон c - или v -зоны и примеси взаимодействие носителей с состояниями обоих слоев приводит к смещению края подзоны (причем, как показано выше, без смещения уровня примеси) в сторону меньших энергий. Этот сдвиг больше при взаимодействии с состояниями валентной зоны, чем зоны проводимости. Наблюдаемые сдвиги подтверждают то, что два верхних примесных состояния в a -SiO₂ не заполнены в равновесном состоянии и в спектрах поглощения проявляется другое положение края подзон, чем в люминесценции, когда наличие неравновесных носителей обуславливает сдвиг края подзон при взаимодействии с тем примесным уровнем, который находится вблизи этого края.

Таким образом, исследование люминесценции и ее возбуждения в короткопериодических ($\leq 20 \text{ \AA}$) аморфных сверхрешетках Si/SiO₂ показывает наличие трех типов излучательных переходов: между подзонами зоны проводимости и валентной зоны, возникающими из-за размерного квантования в слоях a -Si; между примесными состояниями в слоях a -SiO₂ и между подзонами c -зоны a -Si и примесными уровнями a -SiO₂. Это дает независимое прямое подтверждение наличия подзон пространственного квантования в слоях a -Si в СР, обусловленных двумерным характером электронных состояний в этих слоях. Для одной из сверхрешеток (СР-3) найдено энергетическое положение подзоны $k=2$ $E_2=2.9$ эВ, которое не могло быть получено при исследовании поглощения. Обнаружено, что в отличие от широко исследуемых СР на базе соединений А³В⁵ и др., в a -Si/SiO₂ релаксация возбужденных носителей между разными подзонами c - и v -зон слабая. Это дает возможность наблюдать ФЛ, обусловленную высокими подзонами.

В исследуемых СР электроны, возбужденные в слоях a -Si, могут переходить в соседние слои a -SiO₂ или с испусканием фотона при рекомбинации на примесных уровнях плавленого кварца (кросс-люминесценция), или возможен резонансный перенос электронов на соседние примесные состояния a -SiO₂ и дальнейшая рекомбинация в этих слоях. Возбуждение примесных переходов в слоях a -SiO₂ через состояния подзон слоев a -Si в СР приводит к увеличению интенсивности этой люминесценции СР в $\sim 10^4$ раз по сравнению с отдельными слоями a -SiO₂. Сравнение спектров ФЛ и ВФЛ сверхрешеток a -Si/SiO₂ и толстых слоев a -SiO₂ показывает отсутствие влияния квантоворазмерных эффектов на энергетические состояния глубоких дефектов в слоях a -SiO₂ даже для таких короткопериодических СР.

Быстрая безызлучательная рекомбинация возбужденных носителей в слоях a -Si даже при низких температурах (вплоть до 4.2 К) приводит к отсутствию люминесценции этих слоев при непрерывном возбуждении, когда излучательные переходы происходят только в слоях a -SiO₂ в СР.

Уменьшение влияния безызлучательных переходов при пикосекундном возбуждении позволяет наблюдать ФЛ, связанную с состояниями размерного квантования слоев α -Si в СР: межподзонную и кросслоямиесценцию.

На основании исследований ФЛ, ВФЛ и поглощения предложена схема электронных состояний СР α -Si/SiO₂, позволяющая удовлетворительно объяснить с единых позиций наблюдаемые особенности спектров.

Авторы выражают благодарность Ф. А. Пудонину за предоставленные образцы сверхрешеток.

Список литературы

- [1] M. Jaros, *Physics and applications of semiconductor microstructures*, Oxford Univ. Press, 1989, 378 p.
- [2] Hirose M., Miyazaki S. // *J. Non-Cryst. Sol.* 1988. V. 66. P. 327—332.
- [3] Sham L. J., Lu Y.-T. // *J. Lum.* 1989. V. 44. P. 207—221.
- [4] Murayama Y. // *Phys. Rev. B.* 1986. V. 36. P. 2500—2508.
- [5] Abeles B., Tiedje T. // *Phys. Rev. Lett.* 1983. V. 51. P. 2003—2006.
- [6] Frova A., in: *Tetrahedrally-Bonded Amorphous Semiconductors* / ed. by D. Adler /, New York, Plenum, 1985, P. 223—229.
- [7] Плотников А. Ф., Пудонин Ф. А., Стопачинский В. Б. // *Письма в ЖЭТФ.* 1987. Т. 46. N 11. С. 443—446.
- [8] Vinogradov E. A., Denisov V. N., Zayats A. V., Mavrin B. N., Makarov G. I., Oktyabrsky S. R., Pudonin F. A. // *Proc. Conf. on Optoelectronics. Shanghai, World Scientific Publ.*, 1991 (in print).
- [9] Vinogradov E. A., Заяц А. В., Пудонин Ф. А. // *ФТТ.* 1991. Т. 33. N 1. С. 197—201.
- [10] Vinogradov E. A., Denisov V. N., Zayats A. V., Mavrin B. N., Nikogosyan D. N., Repeyev Yu. A., Pudonin F. A. // in: «Nonlinearity and disorder» / ed. by St. Pnevmatikos /, Berlin, Springer-Verlag, 1991, (in print).
- [11] Крюков П. Г., Матвеев Ю. А., Никогосян Д. В., Шарков А. В. // *Квантовая электроника.* 1978. Т. 5. N. 12. С. 2348—2452.
- [12] Shah J., Pinczuk A., Gossard A. C., Wiegmann W. // *Phys. Rev. Lett.* 1985. V. 54. P. 2045—2048.
- [13] Imhoff E. A., Bell M. T., Horman R. A. // *Sol. St. Comm.* 1985. V. 54, P. 845—848.
- [14] Денисов В. Н., Маврин Б. Н., Пудонин Ф. А., Виноградов Е. А. // *ФТТ.* 1990. Т. 32. № 5. С. 2174—2177.
- [15] Гордеев А. А., Горчаков А. П. // *Опт. и спектр.* 1989. Т. 66. № 2. С. 662—665.
- [16] Bonnefoi A. R., McGill T. C., Burnham R. D. // *Phys. Rev. B.* 1988. V. 37. P. 8754—8759.

Институт спектроскопии
АН СССР
Троицк

Поступило в Редакцию
9 января 1991 г.