

05.2;06.3;07

©1993

ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В ВИДИМОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА В КРЕМНИЕВЫХ КОМПОЗИТНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ

*В.Г.Бару, М.И.Елинсон, Л.Ю.Захаров,
В.И.Покалякин, Г.В.Степанов, С.А.Терешин*

В последнее время большое внимание привлекает проблема создания кремниевых источников видимого света, эффективных при комнатных температурах. Такие источники, совместимые с кремниевой интегральной технологией, необходимы для организации оптических связей в СБИС, создания матричных панелей и экранов и т.д. В перспективе на их основе могут быть реализованы оптоэлектронные системы обработки информации.

Один из основных современных подходов к этой проблеме связан с обнаружением и исследованием видимой фото- и электролюминесценции (ЭЛ) в пористом кремнии [1,2]. Предполагается, что размерное квантование в квазиодномерных кремниевых нитях, образующих пористый кремний, превращает этот материал в "прямозонный" и сдвигает максимум люминесценции из ИК в видимую область спектра.

Другой подход, используемый в данной работе, состоит в получении композитных слоев, содержащих размерно-квантованные кластеры Si в матрицах SiO_2 и Si_3N_4 [3,4]. Нанокластеры Si в отличие от квазиодномерных нитей в пористом кремнии являются нульмерными объектами, что усиливает квантовые эффекты. Кроме того, структура металл-композит-полупроводник удобна для реализации электролюминесцентного диода вследствие технологичности и контролируемости инжекции из контактов. Ниже приведены результаты исследования ЭЛ в композитных слоях $\text{SiO}_x\text{-Si}$. Методы получения и диагностики слоев описаны в [3]. Свечение наблюдается как на прямой, так и на обратной ветви ВАХ, имеющей выпрямляющий характер [4]. ЭЛ наблюдалась визуально со стороны прозрачного металлического электрода в виде оранжево-желтого свечения, *однородного* по площади контакта и воспроизводимого при изменении напряжения вплоть до пробоя структуры. На рис. 1 приведены спектральные характеристики ЭЛ структуры полупроводник ($p\text{-Si}$)-композитный слой ($\text{SiO}_x\text{-Si}$)-металл (Au)

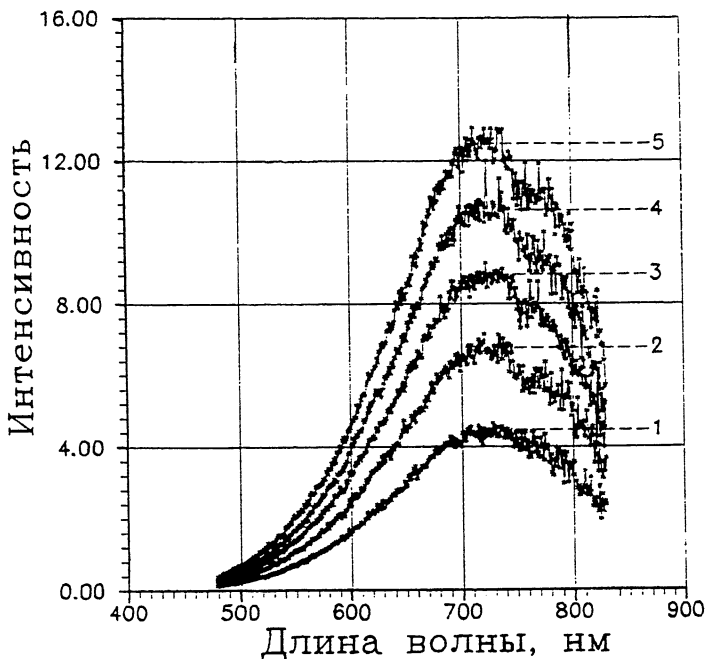


Рис. 1. Спектры электролюминесценции в структуру p -Si-композиционный слой SiO_x -Si-металл (Au) при различных значениях сквозного тока. 1 — 30, 2 — 45, 3 — 60, 4 — 75, 5 — 93 мА. Толщина слоя $L = 400 \text{ \AA}$.

при положительном потенциале на Au. Измерения проводились на компьютеризированной установке в режиме накопления сигнала с использованием решеточного монохроматора и ФЭУ приемника, а также с учетом спектральной чувствительности измерительной системы. Квантовая эффективность ЭЛ, определяемая как отношение числа излучаемых фотонов к числу электронов, проходящих через структуру, была $\sim 10^{-7}$. Следующие факторы влияли на интенсивность люминесценции.

1. Согласно рис. 1, интенсивность растет пропорционально сквозному току.

2. При фиксированном токе переход с обратной ветви ВАХ (“+” на Au) на прямую (“-” на Au) ослабляет интенсивность на 2–3 порядка.

3. Увеличение толщины композиционного слоя ослабляет интегральную интенсивность ЭЛ (рис. 2).

4. Приведенные данные относятся к сильно пересыщенному кремнием композиционному слою SiO_x -Si ($x \approx 1$). При уменьшении пересыщения, а также дополнительном отжиге интенсивность свечения падает, и оно становится неоднородным.

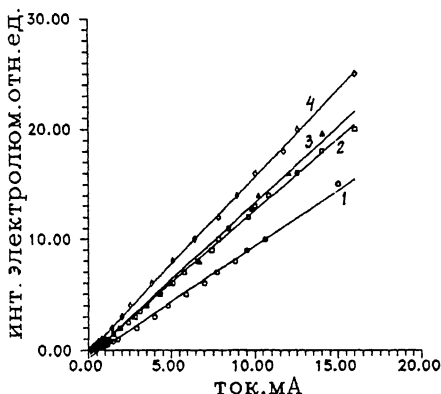


Рис. 2. Зависимость интегральной интенсивности ЭЛ от толщины L слоя $\text{SiO}_x\text{-Si}$: 1 — 800, 2 — 400, 3 — 200, 4 — 100 Å.

5. В температурном интервале $-70 \leq t \leq 70^\circ \text{C}$ ток и интенсивность ЭЛ слабо зависят от температуры.

6. Замена верхнего золотого контакта на ИТО приводила к исчезновению ЭЛ.

Для увеличения интенсивности необходимо выяснить механизм излучения, а также механизмы инжекции и транспорта носителей заряда в композите.

Мы рассматриваем два возможных механизма ЭЛ.

1. Излучательная рекомбинация электронов и дырок, инжектированных в композит из контактов. Характер инжекции существенно зависит от типа подложки и полярности напряжения. В исследуемой структуре ("—" на $p\text{-Si}$) важную роль играет обеднение $p\text{-Si}$, где, согласно расчету, падает большая часть (более 10 В) приложенного к структуре напряжения. При этом в обедненном слое становятся эффективными разогрев носителей заряда и ударная ионизация, что в свою очередь обеспечивает эффективную инжекцию горячих электронов в композит.

Как и в случае пористого кремния, размерное квантование спектра электронов и дырок в нанокластерах Si может объяснить сдвиг максимума излучения в видимую область и ослабление запрета на непрямые оптические переходы. Разброс кластеров по размерам позволяет объяснить уширение и бесструктурность спектра. Однако эффективная излучательная рекомбинация в кремниевых кластерах должна проявляться в фотолюминесценции (ФЛ) при фотовозбу-

ждении композитного слоя. Между тем ФЛ (возбуждение лазером с $\lambda = 0.44$ мкм) в исследованных слоях не обнаружена. На неэффективность объемной излучательной рекомбинации указывает, по нашему мнению, и уменьшение $I_{\text{эл}}$ с ростом толщины композитного слоя (рис. 2). Наконец, при средних полях $E \cong 10^6$ В/см в композите, при которых наблюдается ЭЛ, квантовые ямы в кремниевых кластерах деформируются и, как показывают оценки, максимум рекомбинационного излучения должен сдвигаться в длинноволновую область.

В композитных слоях подобных нашим, но приготовленных путем разложения силана (т.е. с участием водорода), излучательная рекомбинация в видимой области была ответственна за наблюдаемые ФЛ [5] и ЭЛ [6]. Вероятно, в этих случаях, как и в пористом кремнии, водород блокирует оборванные связи и уменьшает роль безызлучательного канала. В наших слоях этот канал, видимо, доминирует.

2. Второй возможный механизм наблюдаемой ЭЛ излучательный распад поверхностных плазмон-поляритонов, возбуждаемых в исследуемой структуре электронами, которые входят в металл с энергиями, превышающими на несколько эВ энергию Ферми в Au. В нашей структуре это могут быть электроны, которые туннелируют в разрешенную зону SiO_x и затем достигают металла с энергией, соответствующей барьеру $\text{SiO}_x\text{-Au}$. При увеличении толщины композита число таких электронов падает вследствие их захвата кластерами и соответственно падает интенсивность ЭЛ.

Высвечивание поверхностных поляритонов происходит на неоднородностях в металле и композите. При этом размерное квантование в кремниевых кластерах может существенно изменить спектр поверхностных поляритонов и облегчить их излучательный распад.

Мы отдаем предпочтение поляритонному механизму ЭЛ. Однако вклад рекомбинационного механизма может заметно возрасти при изменении технологии и условий эксперимента. Для активизации обоих механизмов и повышения эффективности ЭЛ необходимы дальнейшие исследования.

Список литературы

- [1] *Canham L.T.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P. 1046-1048.
- [2] *Richter A., Steiner P. et al.* // IEEE El. Dev. Lett. 1991. V. 12. P. 691-692.
- [3] *Бару В.Г., Терешин С.А. и др.* // Микроэлектроника 1991. Т. 20. N 3. С. 227-235.

- [4] Бару В.Г., Терешин С.А. и др. // Микроэлектроника 1993. Т. 22. N 3. С. 20-22.
- [5] Takagi H., Ogawa H. et al. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 24. P. 2379-2380.
- [6] Dimaria D.J., Kirtley J.R. et al. // J. Appl. Phys. 1984. V. 56. P. 401-416.

Институт радиотехники
и электроники РАН
Москва

Поступило в Редакцию
10 октября 1993 г.
